

Grado en Ingeniería Mecánica
2017-2018

Trabajo Fin de Grado

“Caracterización del comportamiento de fluidos dilatantes a diferentes temperaturas”

Iván Domínguez Domínguez

Tutores

Andrés Gómez Morón

María Jesús López Boada

Leganés, 2018



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons
Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se va a realizar una serie de ensayos para determinar el comportamiento reológico de propilenglicol con partículas de sílice, un fluido no dilatante, cuando se somete a estos cambios de temperatura.

Se realizarán el mezclado de las suspensiones necesarias para llevar a cabo estos ensayos y varios ensayos en los que no solo se variará la temperatura a la que está sometido el fluido, sino que también se cambiará su estructura interna variando la fracción másica de la concentración y el tipo de ensayo al que se le somete, realizando ensayos rotacionales en los que se aumenta gradualmente el esfuerzo cortante al que está sometido el fluido y ensayos oscilatorios en los que se aumentará la amplitud de la tensión.

Como resultado de los ensayos rotacionales se ha obtenido una fuerte dependencia de la viscosidad con la temperatura y con la fracción másica, disminuyendo cuando la temperatura aumenta o cuando se disminuye la fracción másica.

Por otra parte, los ensayos oscilatorios han arrojado como resultado una disminución de la viscosidad compleja cuando se aumenta la temperatura de ensayo o cuando hay una disminución en la fracción másica de la muestra.

Palabras clave

Reología; Fluidos no newtonianos; Fluidos Dilatantes; Temperatura; Viscosidad

Dedicatoria

En primer lugar, me gustaría agradecer a Andrés Gómez por confiar en mí a la hora de realizar esta Tesis y por toda su ayuda y los conocimientos prestados durante su realización.

También me gustaría agradecerle a mi familia, en especial a mis padres, por todo el apoyo que me han dado durante todos mis años de estudios y que se han preocupado porque nunca me faltase nada.

Finalmente a todos mis amigos, sin vosotros todos estos años habrían sido más duros y aburridos.

Sin todos vosotros nunca habría llegado hasta aquí.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Objetivos del proyecto.....	2
1.3. Estructura del proyecto	2
Capítulo 2 Reología y clasificación de los fluidos.....	4
2.1. Reología y viscosidad.....	5
2.1.1. Reología.....	5
2.1.1.1. Definición.....	5
2.1.1.2. Historia de la reología	5
2.1.2. Viscosidad	7
2.1.2.1. Tipos de viscosidad	7
2.1.2.1.1. Viscosidad dinámica	7
2.1.2.1.2. Viscosidad cinemática	8
2.1.2.1.3. Viscosidad aparente	8
2.2. Clasificación de los fluidos	9
2.2.1. Fluidos viscosos o newtonianos	9
2.2.2. Fluidos viscosos no lineales o no newtonianos	10
2.2.2.1. Independientes del tiempo de aplicación	10
2.2.2.1.1. Fluidos sin esfuerzo umbral.....	10
2.2.2.1.1.1. Fluidos pseudoplásticos o Shear Thinning	10
2.2.2.1.1.2. Fluidos dilatantes o Shear Thickening.....	12
2.2.2.1.2. Fluidos con esfuerzo umbral.....	12
2.2.2.1.2.1. Fluidos Plásticos	12
2.2.2.2. Dependientes del tipo de aplicación.....	13
2.2.2.2.1. Tixotropía.....	13
2.2.2.2.2. Reopexia	14
2.2.3. Fluidos viscoelásticos	15
2.3. Viscoelasticidad.....	16
2.3.1. Modelo de Maxwell.....	17

2.3.2.	Modelo de Kelvin-Voigt.....	18
2.3.3.	Modelo de Burgers	18
2.4.	Ecuaciones de flujos viscosos	19
2.4.1.	Ley de Newton	19
2.4.2.	Ley de potencia.....	20
2.4.3.	Modelo de Bingham	20
2.4.4.	Modelo de Herschel-Bulkley.....	20
2.4.5.	Modelo de Casson	20
Capítulo 3 Fluidos Dilatantes o Shear Thickening Fluids.....		21
3.1.	Introducción y teorías de su comportamiento.....	22
3.1.1.	Teorías de su comportamiento.....	23
3.1.1.1.	Transición orden-desorden.....	23
3.1.1.2.	Hydroclusters	23
3.1.1.3.	Dilatancia	24
3.2.	Tipos de STF	24
3.2.1.	Shear thickening continuo	24
3.2.2.	Shear thickening discontinuo	25
3.3.	Parámetros de control	26
3.3.1.	Fracción volumétrica	26
3.3.2.	Tamaño de la partícula	27
3.3.3.	Forma de la partícula	28
3.3.4.	Temperatura.....	28
3.4.	Aplicaciones actuales	29
Capítulo 4 Ensayos en reómetro		31
4.1.	Historia de reómetros.....	32
4.1.1.	Tipos de reómetros	32
4.1.1.1.	Reómetro de cilindros concéntricos	32
4.1.1.2.	Reómetro de doble pared.....	33
4.1.1.3.	Reómetros de platos paralelos.....	33
4.1.1.4.	Reómetros de cono y plato	34
4.1.1.5.	Reómetros rotacionales	35

4.2.	Ensayos rotacionales.....	36
4.2.1.	Ensayos a tensión o velocidad de cizalla constante.....	36
4.2.2.	Ensayos de incremento de tensión constante.....	37
4.2.3.	Ensayos de incremento y reducción constante de tensión.....	37
4.2.4.	Ensayos de fluido escalonado o flujo estacionario	38
4.2.5.	Ensayos de incremento de temperatura	39
4.3.	Ensayos oscilatorios	39
4.3.1.	Tipos de ensayos rotacionales	41
4.3.1.1.	Ensayos rotacionales de deformación dinámica.....	41
4.3.1.2.	Ensayos rotacionales de barrido de tiempo	42
4.3.1.3.	Ensayos rotacionales de barrido de frecuencia	42
4.3.1.4.	Ensayo de rampa de temperatura	43
4.3.1.5.	Ensayo de salto de temperatura.....	44
Capítulo 5 Metodología de ensayo		45
5.1.	Mezclado del material	46
5.2.	Protocolo de ensayos	46
Capítulo 6 Resultados		49
6.1.	Resultados de los ensayos rotacionales	50
6.1.1.	Resultados obtenidos para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento	50
6.1.2.	Resultados obtenidos para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento	52
6.1.3.	Resultados obtenidos para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento	54
6.1.4.	Resultados obtenidos para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento	56
6.1.5.	Comparación de los resultados para las diferentes muestras.....	57
6.2.	Resultados de los ensayos oscilatorios	60
6.2.1.	Resultados obtenidos para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento	60
6.2.2.	Resultados obtenidos para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento	64

6.2.3. Resultados obtenidos para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento	68
6.2.4. Resultados obtenidos para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento	72
6.2.5. Comparación de los resultados para las diferentes muestras.....	75
6.3. Resumen de los resultados obtenidos	79
6.3.1. Resultados obtenidos en ensayos rotatorios para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento	79
6.3.2. Resultados obtenidos en ensayos rotatorios para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento	81
6.3.3. Resultados obtenidos en ensayos rotatorios para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento	83
6.3.4. Resultados obtenidos en ensayos rotatorios para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento	85
6.3.5. Comparación de resultados en ensayos rotatorios para muestras con distintas fracciones másicas.....	87
6.3.6. Resultados obtenidos en ensayos oscilatorios para la muestra con para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento	89
6.3.7. Resultados obtenidos en ensayos oscilatorios para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento	92
6.3.8. Resultados obtenidos en ensayos oscilatorios para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento	94
6.3.9. Resultados obtenidos en ensayos oscilatorios para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento	97
6.3.10. Comparación de resultados en ensayos oscilatorios para muestras con distintas fracciones másicas.....	99
Capítulo 7 Conclusiones y trabajos futuros.....	102
7.1. Conclusiones.....	103
7.2. Trabajos futuros.....	104
Bibliografía.....	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6.1. Resultados ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.....	79
Tabla 6.2. Resultados obtenidos en ensayos rotatorios para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.	81
Tabla 6.3. Resultados obtenidos en ensayos rotatorios para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.	83
Tabla 6.4. Resultados obtenidos en ensayos rotatorios para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.	85
Tabla 6.5. Resultados obtenidos en ensayos rotatorios para las distintas muestras a 35°C.	87
Tabla 6.6. Resultados obtenidos para las viscosidades complejas y las deformaciones en los ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.....	89
Tabla 6.7. Resultados obtenidos para los módulos y el ángulo de fase en los ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.	89
Tabla 6.8. Resultados obtenidos para las viscosidades complejas y las deformaciones en los ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.....	92
Tabla 6.9. Resultados obtenidos para los módulos y el ángulo de fase en los ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.	92
Tabla 6.10. Resultados obtenidos para las viscosidades complejas y las deformaciones en los ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.....	94
Tabla 6.11. Resultados obtenidos para los módulos y el ángulo de fase en los ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.....	94
Tabla 6.12. Resultados obtenidos para las viscosidades complejas y las deformaciones en los ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.....	97
Tabla 6.13. Resultados obtenidos para los módulos y el ángulo de fase en los ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.....	97
Tabla 6.14. Resultados obtenidos para las viscosidades complejas y las deformaciones en ensayos oscilatorios para las distintas muestras a 25°C.	99
Tabla 6.15. Resultados obtenidos para los módulos y el ángulo de fase en ensayos oscilatorios para las distintas muestras a 25°C.	99

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Fig. 2.1. Curva de fluidez para representar la viscosidad dinámica. Gráfico realizado con la información de [1].	8
Fig. 2.2. Curva de fluidez para representar la viscosidad aparente. Gráfico realizado con la información de [1].	9
Fig. 2.3. Clasificación de los fluidos. Figura realizada con la información de [1].	9
Fig. 2.4. Curvas de fluidez y viscosidad de un fluido newtoniano [1].	10
Fig. 2.5. Curvas de fluidez y viscosidad para un fluido pseudoplástico [2].	11
Fig. 2.6. Representación del proceso de orientación de varillas bajo la aplicación de un esfuerzo cortante [1].	11
Fig. 2.7. Representación del proceso por el que las moléculas filamentosas se desenredan bajo la aplicación de un esfuerzo cortante [1].	11
Fig. 2.8. Curvas de fluidez y viscosidad de un fluido dilatante [2].	12
Fig. 2.9. Curva de fluidez para distintos fluidos plásticos [2].	13
Fig. 2.10. Curva de fluidez y viscosidad de un fluido tixotrópico [2].	14
Fig. 2.11. a) Estructura tipo Card House. b) Estructura tipo armadura. c) Estructura tipo perlas encadenadas. [1].	14
Fig. 2.12. Curvas de fluidez y viscosidad para un fluido reopéctico [2].	15
Fig. 2.13. Representación del modelo de Maxwell [1].	15
Fig. 2.14. a) Gráfica deformación-tiempo para un sólido de Hooke. b) Gráfica deformación-tiempo para un líquido de Newton. Ilustración realizada con la información de [2].	16
Fig. 2.15. a) representación gráfica del modelo de Newton b) Representación gráfica del modelo de Hooke [2].	17
Fig. 2.16. Representación gráfica del modelo de Maxwell y su gráfica deformación-tiempo [2].	17
Fig. 2.17. Representación gráfica del modelo de Kelvin-Voigt y su gráfica de deformación-tiempo [2].	18
Fig. 2.18. Representación gráfica del modelo de Burgers y su gráfica deformación-tiempo [2].	19
Fig. 3.1. Gráfica de viscosidad para un fluido dilatante [3].	22
Fig. 3.2. Representación de la formación de hydroclusters bajo cizalladura [9].	23
Fig. 3.3. Curvas de fluidez donde se compara los Shear thickening continuos, discontinuos y los fluidos viscosos. Gráfica realizada con la información de [4].	25
Fig. 3.4. Curvas de viscosidad y fluidez que muestran la evolución de un DST para diferentes fracciones volumétricas [4].	25
Fig. 3.5. Efecto de la fracción volumétrica en la viscosidad [10].	27
Fig. 3.6. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla para distintos tamaños de partícula [11].	27
Fig. 3.7. Gráfica de viscosidad para un STF a distintas temperaturas [3].	28
Fig. 3.8. Esquema de un embrague que emplea STF para mejorar su rendimiento [16].	29
Fig. 3.9. Daño de Kevlar y STF-Kevlar en una prueba de resistencia apuñaladas con una masa de 2.34kg y una altura de 0.75 metros [9].	30
Fig. 4.1. Esquema que muestra la geometría de un reómetro de cilindros concéntricos [17].	32
Fig. 4.2. Esquema que muestra la geometría de un reómetro de doble pared [17].	33
Fig. 4.3. Esquema que muestra la geometría de un reómetro de platos paralelos [17].	34
Fig. 4.4. Esquema que muestra la geometría de un reómetro de plato y cono [17].	35
Fig. 4.5. Esquema que muestra la geometría de un reómetro de torsión rectangular [17].	36

Fig. 4.6. Gráfica de tensión o velocidad de cizalla frente al tiempo para un ensayo a tensión o velocidad de cizalla constante [17].	37
Fig. 4.7. Gráfica de incremento de la tensión frente al tiempo para un ensayo de incremento de tensión constante [17].	37
Fig. 4.8. Gráfica de la variación de tensión frente al tiempo para un ensayo de incremento y reducción constante de tensión [17].	38
Fig. 4.9. Gráfica que muestra la tensión o la deformación para un ensayo de flujo escalonado [17].	38
Fig. 4.10. Gráfica que representa el incremento de temperatura y la tensión o velocidad de cizalla para un ensayo de incremento de temperatura [17].	39
Fig. 4.11. Gráfica obtenida en un ensayo oscilatorio [17].	39
Fig. 4.12. Gráfica para un ensayo rotacional para un comportamiento elástico perfecto (ángulo de fase igual a 0°) y para un comportamiento viscoso (ángulo de fase 90°) [17].	40
Fig. 4.13. Representación del módulo complejo, el módulo elástico y el módulo viscoso como vectores [17].	41
Fig. 4.14. Gráfica de un ensayo oscilatorio de deformación dinámica [17].	42
Fig. 4.15. Gráfica de un ensayo rotacional de barrido de tiempo [17].	42
Fig. 4.16. Gráfica de un ensayo rotacional de barrido de frecuencia dinámica [17].	43
Fig. 4.17. Gráfica que muestra el aumento de la temperatura con el tiempo en un ensayo rotacional de rampa de temperatura [17].	43
Fig. 4.18. Representación de la variación de la temperatura con el tiempo en un ensayo oscilatorio de salto de temperatura [17].	44
Fig. 5.1. Muestra sometida a un ensayo en reómetro.	47
Fig. 5.2. Diagrama del proceso seguido durante los ensayos.	48
Fig. 6.1. Curva de viscosidad para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 7.5 por ciento a diferentes temperaturas.	50
Fig. 6.2. Curva de fluidez para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 7.5 por ciento a diferentes temperaturas.	51
Fig. 6.3. Curva de viscosidad para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 10 por ciento a diferentes temperaturas.	52
Fig. 6.4. Curva de fluidez para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 10 por ciento a diferentes temperaturas.	53
Fig. 6.5. Curva de viscosidad para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 12.5 por ciento a diferentes temperaturas.	54
Fig. 6.6. Curva de fluidez para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 12.5 por ciento a diferentes temperaturas.	55
Fig. 6.7. Curva de viscosidad para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 15 por ciento a diferentes temperaturas.	56
Fig. 6.8. Curva de fluidez para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 15 por ciento a diferentes temperaturas.	57
Fig. 6.9. Comparación de la curva de viscosidad a una temperatura de 35°C para las distintas muestras con una fracción másica de 7.5%, 10%, 12.5% y 15%.	58
Fig. 6.10. Comparación de la curva de fluidez a una temperatura de 35°C para las distintas muestras con una fracción másica de 7.5%, 10%, 12.5% y 15%.	59
Fig. 6.11. Viscosidad compleja en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento a diferentes temperaturas.	60
Fig. 6.12. Módulo viscoso en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento a distintas temperaturas.	61

Fig. 6.13. Módulo elástico en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento a distintas temperaturas.	62
Fig. 6.14. Módulo complejo en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento a distintas temperaturas.	63
Fig. 6.15. Viscosidad compleja en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento a diferentes temperaturas.	64
Fig. 6.16. Módulo viscoso en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento a distintas temperaturas.	65
Fig. 6.17. Módulo elástico en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento a distintas temperaturas.	66
Fig. 6.18. Módulo complejo en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento a distintas temperaturas.	67
Fig. 6.19. Viscosidad compleja en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento a diferentes temperaturas.	68
Fig. 6.20. Módulo viscoso en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento a distintas temperaturas.	69
Fig. 6.21. Módulo elástico en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento a distintas temperaturas.	70
Fig. 6.22. Módulo complejo en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento a distintas temperaturas.	71
Fig. 6.23. Viscosidad compleja en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento a diferentes temperaturas.	72
Fig. 6.24. Módulo viscoso en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento a distintas temperaturas.	73
Fig. 6.25. Módulo elástico en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento a distintas temperaturas.	74
Fig. 6.26. Módulo viscoso en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento a distintas temperaturas.	75
Fig. 6.27. Comparación de las viscosidades complejas para las distintas muestras con una fracción másica del 7.5%, 10%, 12.5% y 15% en el ensayo a 25°C.....	76
Fig. 6.28. Comparación del módulo viscoso a una temperatura de 25°C para las distintas muestras con una fracción másica de 7.5%, 10%, 12.5% y 15%.....	77
Fig. 6.29. Comparación del módulo elástico a una temperatura de 25°C para las distintas muestras con una fracción másica de 7.5%, 10%, 12.5% y 15%.....	78
Fig. 6.30. Comparación del módulo complejo a una temperatura de 25°C para las distintas muestras con una fracción másica de 7.5%, 10%, 12.5% y 15%.....	79
Fig. 6.31. Viscosidad máxima y viscosidad inicial obtenida en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.....	80
Fig. 6.32. Velocidad de cizalla máxima y velocidad de cizalla inicial obtenida en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.	80
Fig. 6.33. Tensión máxima para los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.	81
Fig. 6.34. Viscosidad máxima y viscosidad inicial obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.....	82
Fig. 6.35. Velocidad de cizalla máxima y velocidad de cizalla inicial obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.	82
Fig. 6.36. Tensiones máximas obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.....	83

Fig. 6.37. Viscosidad máxima y viscosidad inicial obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.....	84
Fig. 6.38. Velocidad de cizalla máxima y velocidad de cizalla inicial obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.	84
Fig. 6.39. Tensiones máximas obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.....	85
Fig. 6.40. Viscosidad máxima y viscosidad inicial obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.....	86
Fig. 6.41. Velocidad de cizalla máxima y velocidad de cizalla inicial obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.	86
Fig. 6.42. Tensiones máximas obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.....	87
Fig. 6.43. Comparación de la viscosidad inicial y la viscosidad máxima para distintas fracciones másicas a 35 grados.....	88
Fig. 6.44. Comparación de la velocidad de cizalla inicial y la velocidad de cizalla máxima para distintas fracciones másicas a 35 grados.....	88
Fig. 6.45. Comparación de la tensión inicial para distintas fracciones másicas a 35 grados.	89
Fig. 6.46. Viscosidades complejas iniciales y máximas en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.....	90
Fig. 6.47. Deformaciones iniciales y máximas en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.....	90
Fig. 6.48. Módulos viscoso, elástico y complejo en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.....	91
Fig. 6.49. Ángulo de fase en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.....	91
Fig. 6.50. Viscosidades complejas iniciales y máximas en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.....	92
Fig. 6.51. Deformaciones iniciales y máximas en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.....	93
Fig. 6.52. Módulos viscoso, elástico y complejo en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.....	93
Fig. 6.53. Ángulo de fase en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.....	94
Fig. 6.54. Viscosidades complejas iniciales y máximas en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.....	95
Fig. 6.55. Deformaciones iniciales y máximas en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.....	95
Fig. 6.56. Módulos viscoso, elástico y complejo en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.....	96
Fig. 6.57. Ángulo de fase en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.....	96
Fig. 6.58. Viscosidades complejas iniciales y máximas en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.....	97
Fig. 6.59. Deformaciones iniciales y máximas en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.....	98
Fig. 6.60. Módulos viscoso, elástico y complejo en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.....	98

Fig. 6.61. Ángulo de fase en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.....	99
Fig. 6.62. Comparación de las viscosidades complejas iniciales y máximas para ensayos oscilatorios en muestras de diferente fracción másica a 25 °C.....	100
Fig. 6.63. Comparación de las deformaciones iniciales y máximas para ensayos oscilatorios en muestras de diferente fracción másica a 25 °C.....	100
Fig. 6.64. Comparación de los módulos viscosos, elásticos y complejos máximos para ensayos oscilatorios en muestras de diferente fracción másica a 25 °C.....	101
Fig. 6.65. Comparación del ángulo de fase para ensayos oscilatorios en muestras de diferente fracción másica a 25 °C.	101

Capítulo 1 Introducción

1.1.Introducción

Los fluidos dilatantes son un tipo de fluido no newtoniano en el que al aplicarles una cierta fuerza comienzan a comportarse como sólidos. Durante años se evitaron ya que causaban problemas en cañerías y bombas, pero después de la Segunda Guerra Mundial se comenzó a investigar más acerca de los orígenes de su comportamiento y se empezaron a encontrar distintas aplicaciones industriales.

Aunque parece que en un futuro su aplicación industrial será más extendida, hoy en día su uso está limitado por factores como el rango de temperaturas y presiones a las que se produce este comportamiento y porque aún no se ha definido completamente los mecanismos que originan este comportamiento.

Los fluidos dilatantes son buenos absorbiendo energía y por tanto se estudia su uso en aplicaciones tales como embragues, suspensiones o chalecos antibalas, aunque sus aplicaciones pueden ser más extensas, pudiéndose emplear también en la industria aeroespacial, en estructuras o en equipamiento deportivo, pero sus aplicaciones actuales son pocas.

1.2.Objetivos del proyecto

Los objetivos de este Trabajo Fin de Grado son:

- Definir el comportamiento de los fluidos dilatantes.
- Estudio de los mecanismos causantes del comportamiento dilatante en fluidos.
- Estudiar las aplicaciones actuales de los fluidos dilatantes.
- Estudiar cómo afecta la temperatura al comportamiento de los líquidos dilatantes durante los ensayos realizados.
- Comparar las muestras con distinta fracción másica para ver la influencia que tiene en el comportamiento dilatante.

1.3.Estructura del proyecto

Este Trabajo Fin de Grado tiene un total de siete capítulos, en el que el primero es esta introducción. A continuación, se hace un breve resumen del contenido de los diferentes capítulos.

- En el capítulo 2, Reología y clasificación de fluidos, se hace una introducción al concepto de Reología, se describe los conceptos básicos de la Reología y se procede a realizar una clasificación de fluidos y explicando su comportamiento.
- En el capítulo 3, Fluidos dilatantes o shear thickening fluids, se profundiza en el comportamiento de este tipo de fluidos, los mecanismos que están detrás de este comportamiento, los diferentes parámetros de control que hay que tener en cuenta, y, por último, se describen diferentes aplicaciones de los fluidos dilatantes.

- En el capítulo 4, Ensayos en reómetro, se describe lo que es un reómetro y los distintos tipos de reómetro que hay, los distintos tipos de ensayos que se pueden realizar y los valores que se pueden obtener con esos ensayos.
- En el capítulo 5, Metodología de ensayo, se detalla cómo se realiza la mezcla que se va a emplear y como se han realizado los ensayos en reómetro con los que se obtendrán los resultados.
- En el capítulo 6, Resultados, se presenta los resultados obtenidos.
- En el capítulo 7, Conclusiones y trabajos futuros, se analiza los resultados obtenidos y se presentan unas conclusiones. También se realiza las propuestas para futuros trabajos respetando esta línea de investigación.

Capítulo 2 Reología y clasificación de los fluidos

2.1.Reología y viscosidad

A continuación, se va a explicar que es la reología y cómo surge y que es la viscosidad, una de las propiedades más importantes dentro del campo de la reología.

2.1.1. Reología

En primer lugar, se va a definir la reología y más adelante se va a explicar su historia.

2.1.1.1.Definición

La reología es la ciencia que estudia la deformación de la materia cuando se le aplica una determinada tensión, estudia la elasticidad, plasticidad y viscosidad de la materia.

El término reología fue acuñado por E.C. Bingham en 1928 y proviene del griego “παντα ρει” que significa todo fluye.

La reología estudia propiedades mecánicas de fluidos y sólidos, por lo tanto, la reología comprende desde la mecánica de fluidos hasta la elasticidad de los sólidos [1].

2.1.1.2.Historia de la reología

El primero que habló de reología fue Robert Hooke en su libro de 1678 “True theory of elasticity” donde establecía que “si se dobla la tensión, se dobla la deformación”, es decir, que la potencia de un muelle es proporcional a su deformación.

Más tarde Isaac Newton publicó su libro “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica” donde se instaure que para un fluido “La resistencia derivada de la falta de deslizamiento de las partes del líquido es proporcional a la velocidad con que se separan unas dentro de él” y se estableció la viscosidad, η , como la medida de la resistencia a fluir.

La tensión que se requiere para deformar un fluido se define F/A , se describe con el símbolo τ y recibe el nombre de tensión de cizalladura. La tensión es proporcional al gradiente de la velocidad, también llamado velocidad de deformación o velocidad de cizalla, representada como du/dy , como D o como $\dot{\gamma}$, de forma que si se dobla la tensión de cizalladura se dobla la velocidad de deformación.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu D = \mu \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

La ecuación 2.1 se conoce como Ley de Newton hoy en día sigue siendo válida para los fluidos Newtonianos.

Al mismo tiempo surgió la Ley de Hooke para sólidos que se define como:

$$\sigma = G\gamma \quad (2.2)$$

Siendo σ la tensión aplicada sobre el sólido, γ la deformación de dicho sólido y G el módulo de rigidez o cizalladura, medido en Pa. La ecuación 2.2 es válida para los sólidos elásticos e indica que el cuerpo va a sufrir una deformación γ mientras se mantenga la tensión σ .

Durante años se clasificaron los materiales como fluidos Newtonianos o como sólidos de Hooke hasta que en 1835 Wilhem Weber realizó un experimento con gusanos de seda donde no se cumplía la ley de Hooke. Weber observó que al aplicar una tensión se producía una deformación inmediata seguida de una deformación que se incrementaba con el tiempo, y que al retirar esa tensión había una recuperación inmediata y una posterior recuperación con el tiempo hasta alcanzar el tamaño original, es decir, había características propias de sólidos y de líquidos.

Más tarde, en 1867, James Clerk Maxwell en su artículo “Sobre la teoría de los gases” creó un modelo que satisfacía el comportamiento de los gusanos de seda durante el experimento de Weber y que se basaba en combinar el comportamiento elástico y viscoso. Este modelo es la base de lo que se utiliza en la actualidad y dio lugar a lo que se conoce como viscoelasticidad, que explica el comportamiento de los materiales con comportamiento intermedio entre los fluidos viscosos y los sólidos elásticos.

Después de Maxwell no se avanzó mucho más hasta la década de 1950, donde aparecen modelos lineales y no lineales de comportamiento y se empezó a estudiar los distintos tipos de materiales viscoelásticos para sus aplicaciones en lanzallamas, creándose modelos donde la deformación también dependía del tiempo, tixotropía y reopexia, y observando que los materiales reales pueden tener un comportamiento viscoso, elástico o viscoelástico.

En 1945 M. Reiner define el número de Deborah, De , como:

$$De = \frac{\tau}{T} \quad (2.3)$$

Siendo τ el tiempo característico del material y T el tiempo característico del proceso de deformación al que está sometido el material. Si en el proceso se obtienen valores altos del número de Deborah el material se comporta como un sólido elástico mientras que si se obtienen valores bajos del número de Deborah significa que se sigue un comportamiento viscoso.

El tiempo de relajación es infinito para un sólido de Hooke y tiene valor nulo para un fluido newtoniano.

Desde ese momento la reología obtuvo un papel importante en diferentes industrias, ya que es utilizada para determinar el comportamiento de polímeros, distintas suspensiones en fluidos o en la industria alimentaria, por ejemplo [1].

2.1.2. Viscosidad

Se define la viscosidad como la resistencia a fluir, es decir, es la propiedad del fluido que da lugar a las fuerzas que se oponen al movimiento relativo en el fluido. Se debe a las fuerzas de atracción entre las distintas moléculas de un fluido que, al fluir, hace que se produzca una cierta fricción. Los líquidos tienen una viscosidad más alta que los gases.

Para determinar lo que es la elasticidad se va a deformar un líquido aplicándole una tensión tangencial. Se comprueba que la velocidad con la que fluye una capa del líquido respecto a otra adyacente es uniforme y origina una fuerza tangencial F proporcional al área de las capas A y al gradiente de dv/dz en dirección normal a la que avanza el fluido [1].

$$F = A\eta \frac{dv}{dz} \quad (2.4)$$

Donde η es la constante de proporcionalidad llamada viscosidad.

La viscosidad crece de manera general al aumentar la temperatura y es independiente de la presión en los gases, mientras que en los líquidos disminuye al aumentar la temperatura o al decrecer la presión. En otros líquidos también puede depender de la tensión de cizalla que se le esté aplicando o a su tiempo de aplicación, lo que origina una forma de clasificar los fluidos en función del comportamiento de su viscosidad [1].

La medida de la viscosidad en el sistema internacional de unidades es el Pa·s, aunque el Poise está ampliamente reconocida, siendo la relación entre ambas:

$$1\text{mPa} \cdot \text{s} = 1\text{cP}$$

2.1.2.1. Tipos de viscosidad

Hay tres tipos de viscosidad, la dinámica, la cinemática y la aparente.

2.1.2.1.1. Viscosidad dinámica

Este es el termino de viscosidad descrito anteriormente. Se obtiene al trazar la función desde el origen en la curva de fluidez y se utiliza en los fluidos newtonianos [2].

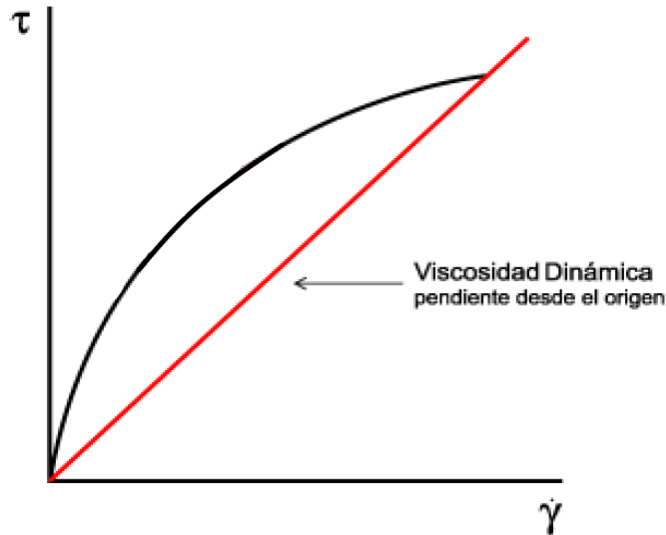


Fig. 2.1. Curva de fluidez para representar la viscosidad dinámica. Gráfico realizado con la información de [1].

2.1.2.1.2. Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido. La viscosidad cinemática se denomina ν y sus unidades en el sistema internacional son m^2/s [1].

La ecuación 2.5 define la viscosidad cinemática.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.5)$$

Donde ν es la viscosidad cinemática, μ la viscosidad dinámica y ρ la densidad del fluido.

2.1.2.1.3. Viscosidad aparente

La viscosidad aparente se representa como η_{app} y se define como el cociente entre la tensión de cizalladura y la velocidad de deformación. Esto representa la pendiente en cada punto de la curva de la curva de fluidez de los fluidos. Esta es la viscosidad representativa en los fluidos no newtonianos [2].

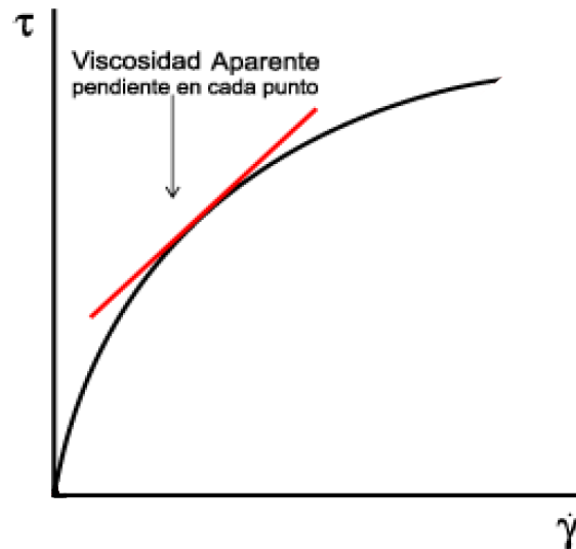


Fig. 2.2. Curva de fluidez para representar la viscosidad aparente. Gráfico realizado con la información de [1].

2.2. Clasificación de los fluidos

Un fluido es una sustancia que se deforma de forma continua al aplicarle una tensión.

Partiendo de la relación entre la fuerza aplicada y la deformación que produce se puede establecer tres tipos diferentes de fluidos.

En la figura 2.3 se muestra un primer vistazo a la clasificación de fluidos que se desarrollará más adelante.

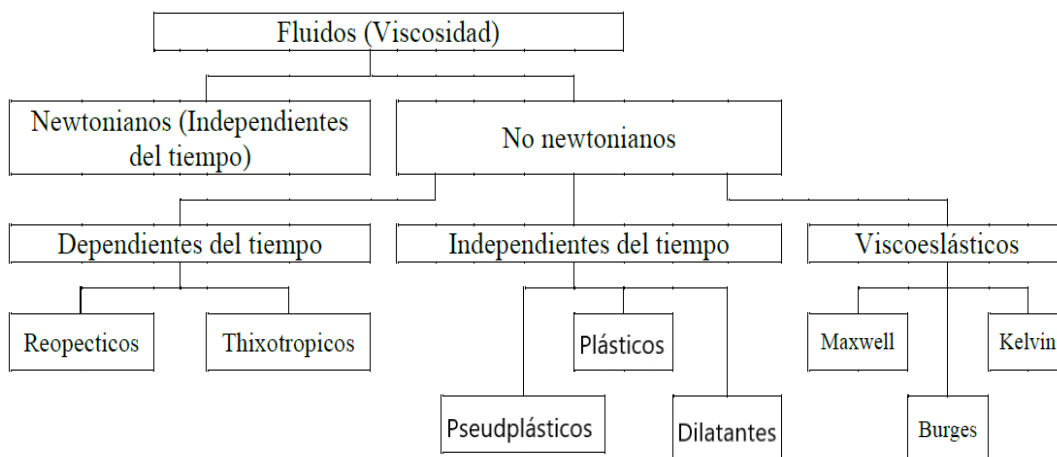


Fig. 2.3. Clasificación de los fluidos. Figura realizada con la información de [1].

2.2.1. Fluidos viscosos o newtonianos

En este tipo de fluidos su viscosidad se mantiene constante con la velocidad de deformación y la tensión de cizalladura y la velocidad de deformación tienen una relación lineal. Su viscosidad solo depende de la temperatura y de la presión, no

depende del tiempo de aplicación de la tensión ni del esfuerzo cortante aplicado. Estos fluidos cumplen la ley de Newton, ecuación 2.1 [2].

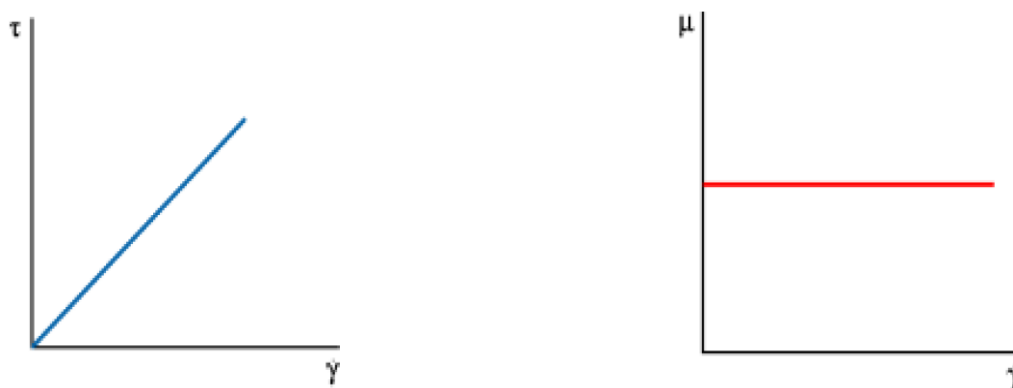


Fig. 2.4. Curvas de fluidez y viscosidad de un fluido newtoniano [1].

Como se observa en la figura 2.4, la relación entre la velocidad de deformación y la tensión de cortadura es lineal. En la curva de viscosidad se puede ver como esta es constante para cualquier valor de la velocidad de deformación.

Los ejemplos más clásicos de fluido newtoniano son el agua, la glicerina y todos los gases.

2.2.2. Fluidos viscosos no lineales o no newtonianos

El valor de la viscosidad depende de la velocidad de deformación a la que se esté sometiendo al fluido y en algunos casos también depende del tiempo, por tanto, la relación entre la tensión de cizalladura y la velocidad de deformación no es lineal. Esta diferencia de comportamiento respecto a los fluidos viscosos se debe a la diferencia en el tamaño de las partículas, siendo los fluidos con partículas pequeñas los que tienen un comportamiento newtoniano y los que poseen un tamaño de moléculas mayor los que tienen un comportamiento no newtoniano. Los fluidos no newtonianos se dividen a su vez en independientes del tiempo o en dependientes del tiempo si su viscosidad varía con el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante.

2.2.2.1. Independientes del tiempo de aplicación

Los fluidos independientes del tiempo, a su vez, se dividen en fluidos sin esfuerzo mínimo umbral y fluidos con esfuerzo mínimo umbral.

2.2.2.1.1. Fluidos sin esfuerzo umbral.

Los fluidos sin esfuerzo umbral se dividen en pseudoplásticos y en dilatantes.

2.2.2.1.1.1. Fluidos pseudoplásticos o Shear Thinning

Son el tipo de fluido no newtoniano más común. La viscosidad aparente de estos fluidos y su tensión de cizalladura no depende del tiempo al que están sometidos

a la cizalladura, pero disminuye al aumentar la velocidad de deformación aplicada sobre el fluido [2].

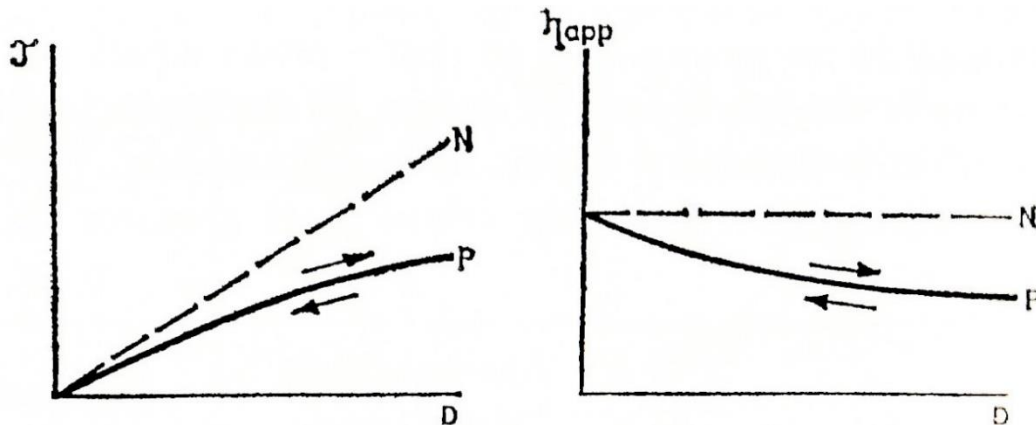


Fig. 2.5. Curvas de fluidez y viscosidad para un fluido pseudoplástico [2].

Este comportamiento se puede explicar de dos maneras. La primera es suponer un flujo de varillas rígidas desordenadas suspendidas en un líquido. Al aplicar un esfuerzo estas varillas tienden a orientarse de manera paralela al esfuerzo, haciendo que la viscosidad disminuya entre más ordenadas estén las varillas. Este comportamiento se puede observar en la figura 2.6.

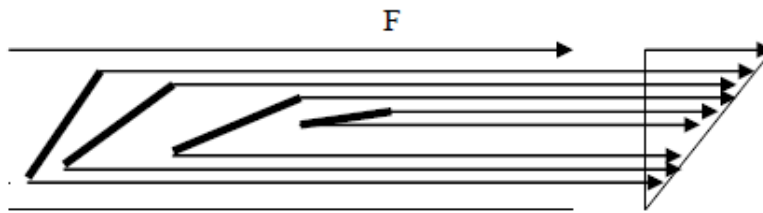


Fig. 2.6. Representación del proceso de orientación de varillas bajo la aplicación de un esfuerzo cortante [1].

Otra explicación es que el fluido pseudoplástico está formado por moléculas filamentosas suspendidas en un líquido newtoniano. Estas moléculas filamentosas al comienzo están enredadas, pero bajo la aplicación de un esfuerzo constante y el aumento de la velocidad de deformación estas moléculas tienden a desenredarse en dirección del flujo disminuyendo la viscosidad [1]. La figura 2.7 es una representación de este comportamiento.

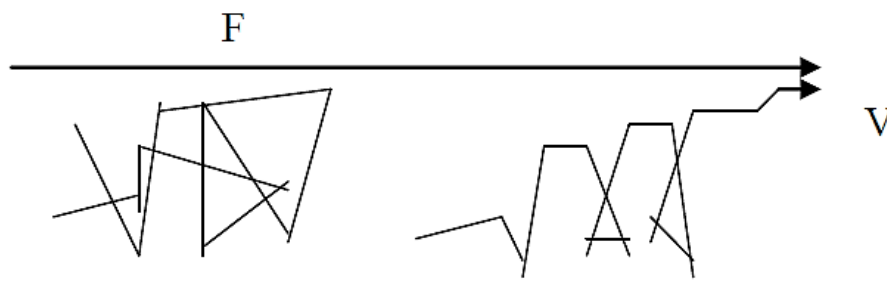


Fig. 2.7. Representación del proceso por el que las moléculas filamentosas se desenredan bajo la aplicación de un esfuerzo cortante [1].

Ejemplos de fluidos pseudoplásticos son el ketchup y la mostaza.

2.2.2.1.1.2. Fluidos dilatantes o Shear Thickening

Su comportamiento es el inverso del de los fluidos pseudoplásticos, es decir, su viscosidad aparente aumenta al aumentar la velocidad de deformación, y la tensión de cizalladura aumenta de manera no lineal con la velocidad de deformación [2].

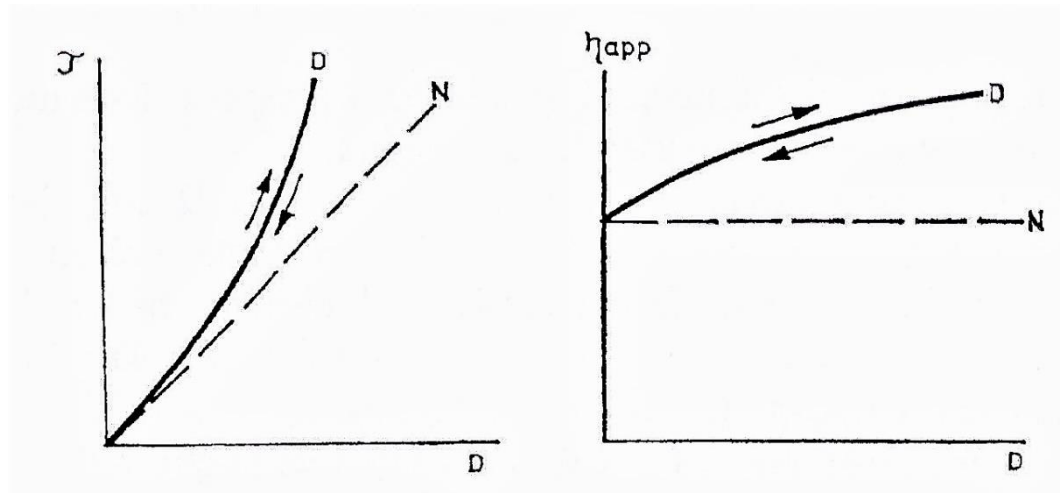


Fig. 2.8. Curvas de fluidez y viscosidad de un fluido dilatante [2].

Se produce debido a una falta de espacio producida por el empaquetamiento de partículas.

El ejemplo más conocido de fluido dilatante es la maicena.

Este tipo de fluidos son los que se van a estudiar a lo largo de este proyecto y se explicará los mecanismos que lo originan y las aplicaciones actuales durante el capítulo 3.

2.2.2.1.2. Fluidos con esfuerzo umbral

2.2.2.1.2.1. Fluidos Plásticos

Estos fluidos se comportan como sólidos hasta que se sobrepasa un esfuerzo umbral, la tensión de deformación plástica τ_0 , y comienzan a comportarse como líquidos. El comportamiento de estos fluidos viene determinado por la fuerte interacción entre sus moléculas, creando puentes de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals.

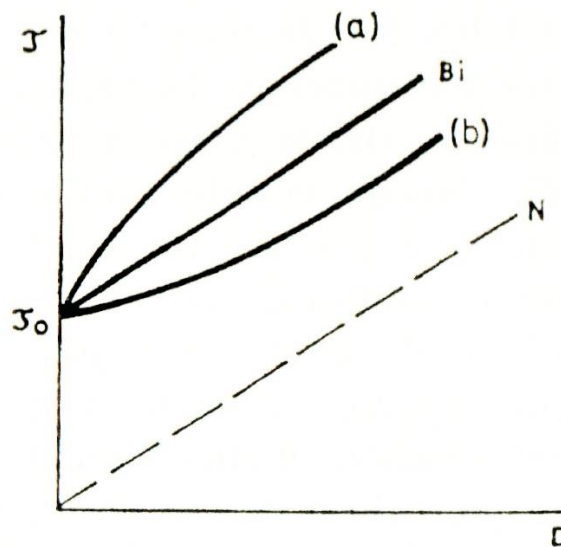


Fig. 2.9. Curva de fluidez para distintos fluidos plásticos [2].

A su vez este tipo de fluidos se pueden dividir en plásticos de Bingham si su relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación es constante una vez superado el esfuerzo umbral, o simplemente plásticos si su relación es no lineal [2].

Un ejemplo de fluido plástico es el chocolate fundido, la mayonesa o la pasta de dientes.

2.2.2.2. Dependientes del tipo de aplicación

2.2.2.2.1. Tixotropía

Los fluidos tixotrópicos presentan un comportamiento en el que la viscosidad aparente disminuye con la velocidad de cizalladura, sin embargo, esta viscosidad aparente no solo depende de la velocidad de cizalladura, sino que también disminuye con el tiempo de aplicación de dicha deformación.

La representación gráfica de un fluido tixotrópico se consigue aumentando la velocidad de cizalladura durante ciertos intervalos hasta un máximo, y luego haciéndola descender del mismo modo hasta alcanzar el valor inicial. Cuando la velocidad de deformación descende el fluido se espesa hasta su comportamiento inicial. Si esta representación depende del tiempo se forma un ciclo de histéresis, es decir que en la representación los valores obtenidos durante la carga y los obtenidos durante la descarga son distintos, por tanto, se debe de tener en cuenta a la hora de realizar la representación gráfica de estos fluidos los intervalos de tiempo en que son realizadas las mediciones [2].

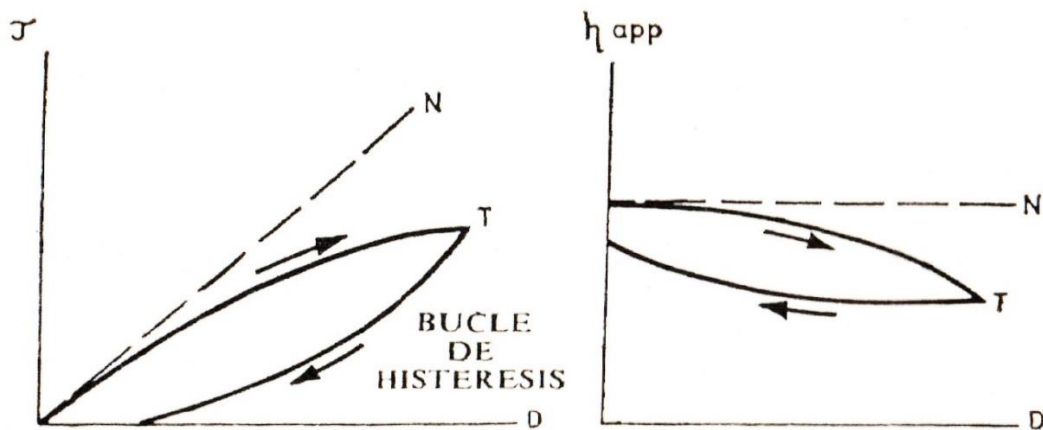


Fig. 2.10. Curva de fluidez y viscosidad de un fluido tixotrópico [2].

Este comportamiento se debe a fuerzas de tipo electroestático que originan un cambio de iones dentro del fluido, provocando atracciones y repulsiones que dan lugar a cambios estructurales. Estos cambios estructurales son los que hacen que disminuya la viscosidad con el tiempo. Hay tres tipos de estructuras para la fase dispersa, la formada por una serie de capas denominada Card House, si se forman diferentes varillas se denomina armadura y si la fase dispersa toma formas esféricas se denomina estructura de perlas encadenadas [1]. Representaciones de estos comportamientos se pueden ver en la figura 2.11.

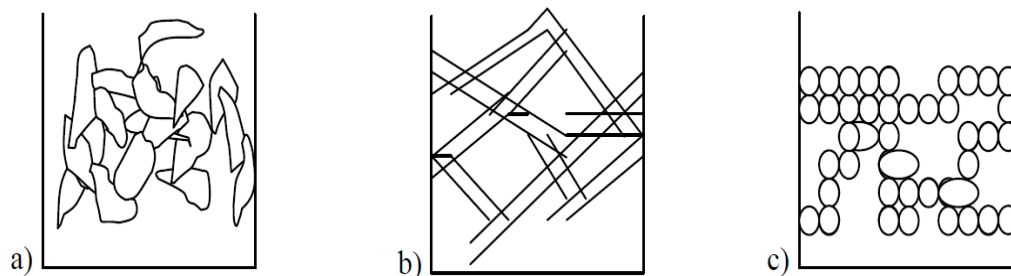


Fig. 2.11. a) Estructura tipo Card House. b) Estructura tipo armadura. c) Estructura tipo perlas encadenadas. [1].

Algún ejemplo de fluido tixotrópico es la tinta de impresión o las pinturas.

2.2.2.2.2. Reopexia

La Reopexia se caracteriza por ser el comportamiento opuesto a la tixotropía, es decir, un espesamiento al aumentar la duración de la deformación sobre el fluido.

Para obtener la representación gráfica de un fluido reopéctico se obtiene de la misma manera que se obtiene para un fluido tixotrópico y por tanto se debe de ser muy cuidadoso con el tiempo para el que se obtienen las lecturas [2].

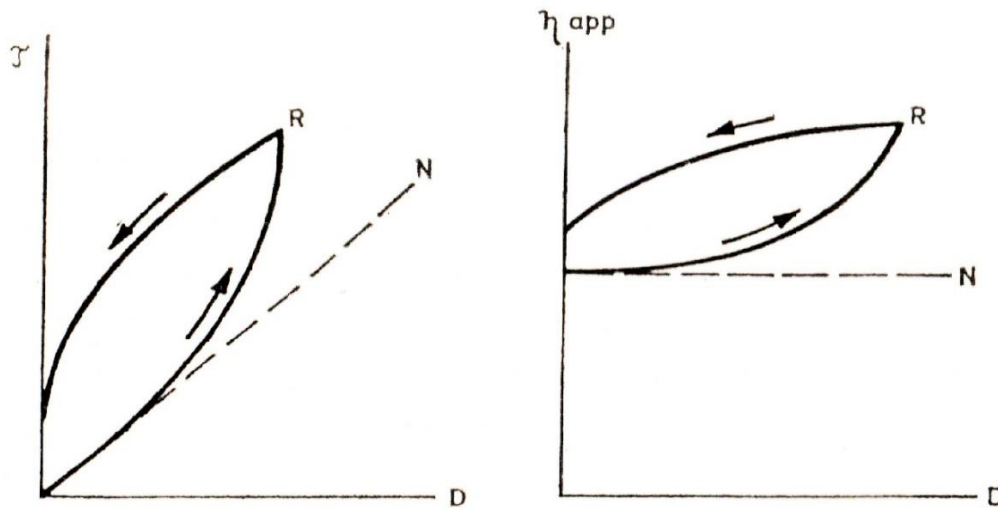


Fig. 2.12. Curvas de fluidez y viscosidad para un fluido reopéctico [2].

Esto se produce porque la fuerza produce una formación de enlaces intermoleculares aumentando la viscosidad.

Un ejemplo de fluido reopéctico es el yeso.

2.2.3. Fluidos viscoelásticos

Los fluidos viscoelásticos son los que presentan propiedades de un fluido viscoso y de un sólido elástico al mismo tiempo. Los fluidos viscoelásticos ideales se caracterizan con el modelo de Maxwell. La figura 2.13 es una representación gráfica del modelo de Maxwell.

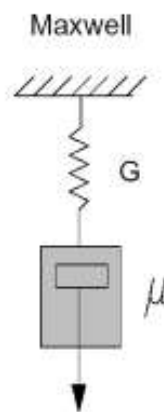


Fig. 2.13. Representación del modelo de Maxwell [1].

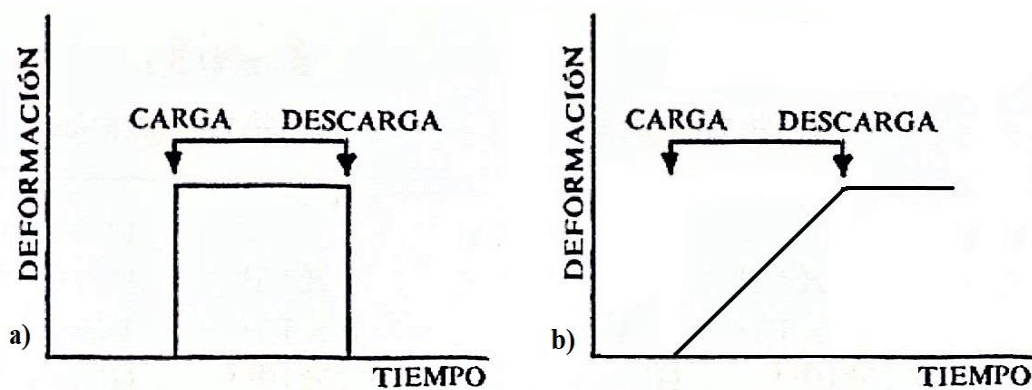
Este comportamiento se debe a la existencia de moléculas muy largas y flexibles en un líquido o a la presencia de partículas sólidas [1].

Un ejemplo de fluidos viscoelásticos es la nata o los helados.

2.3.Viscoelasticidad

La viscoelasticidad es el modelo por el cual se estudia la materia tiene propiedades de un sólido de Hooke y de un líquido de Newton. La viscoelasticidad se produce por la dispersión de partículas elásticas en una disolución, en el caso del líquido viscoelástico, o por una red tridimensional que tiende a desintegrarse bajo los efectos de la tensión para los sólidos viscoelásticos [2].

Si a un sólido de Hooke se le aplica una tensión, este se deformará de manera inmediata, mientras que si se le retira dicha tensión recuperará su estado original. Por otra parte, si se aplica una tensión a un fluido de Newton este se deformará de manera lineal a la velocidad de deformación, pero de manera independiente de la deformación misma, y al retirar la tensión que se le estaba aplicando nunca volverá a recuperar su estado inicial [2].



El comportamiento de un sólido de Hooke y del líquido de Newton son comportamientos ideales y que solo se dan en la realidad para deformaciones infinitesimales, en el caso del sólido de Hooke, o para velocidades de deformación baja y para tamaños de moléculas pequeños en el caso de un líquido de Newton [2].

El comportamiento de un líquido de Newton y un sólido de Hooke se representa esquemáticamente según la figura 2.15.

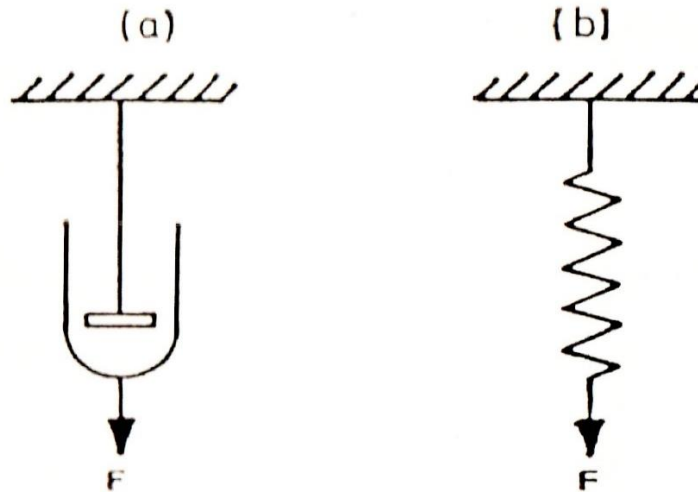


Fig. 2.15. a) representación gráfica del modelo de Newton b) Representación gráfica del modelo de Hooke [2].

Estos dos modelos se pueden acoplar para crear los modelos viscoelásticos más sencillos. Si se acoplan en serie se crea el modelo de Maxwell y representa el comportamiento de un líquido viscoelástico ideal, mientras que si se representan en paralelo representan el comportamiento de un sólido viscoelástico ideal, y recibe el nombre de modelo de Kelvin-Voigt. Ambos modelos pueden acoplarse en serie para obtener el modelo de Burger [2].

2.3.1. Modelo de Maxwell

El modelo de Maxwell representa el comportamiento de un fluido viscoelástico ideal y se obtiene al unir un modelo de Newton y otro de Hooke en serie de modo que los dos elementos están sometidos a la misma tensión y la deformación total del modelo será la suma de las dos deformaciones de los elementos [2].

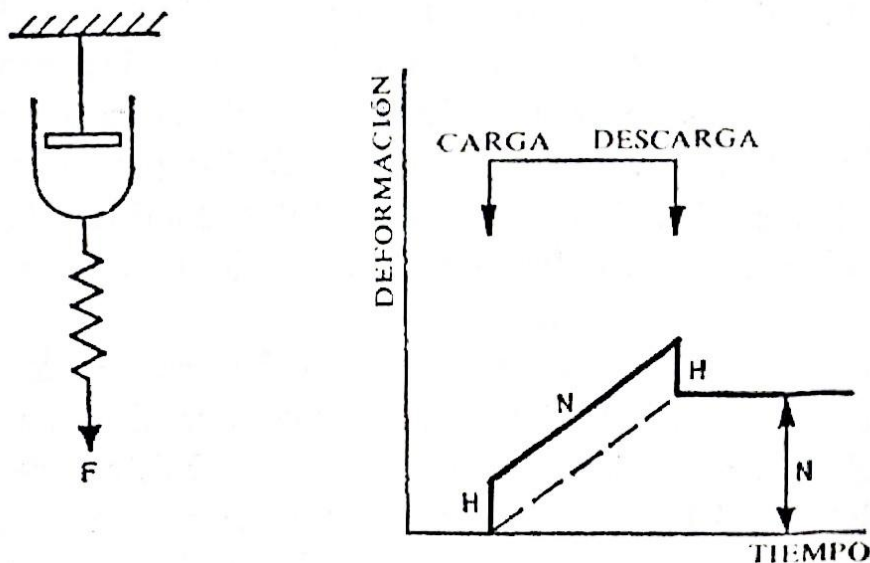


Fig. 2.16. Representación gráfica del modelo de Maxwell y su gráfica deformación-tiempo [2].

Observando la gráfica de deformación-tiempo del modelo de Maxwell se observa un primer incremento de deformación cuando se aplica una tensión, característica del modelo de Hooke, seguido de un incremento gradual de la deformación relacionado con el comportamiento del modelo de Newton. Cuando se retira la tensión se observa una recuperación de la deformación, propio del modelo de Hooke, seguido de una zona donde no se realiza una recuperación de deformación, imitando el comportamiento del modelo de Newton.

2.3.2. Modelo de Kelvin-Voigt

El modelo de Kelvin-Voigt representa el comportamiento de un sólido viscoelástico ideal y se obtiene al unir en paralelo un modelo de Newton y otro de Hooke, por tanto, los elementos deben tener la misma deformación y la tensión total será la suma de tensiones de los dos elementos [2].

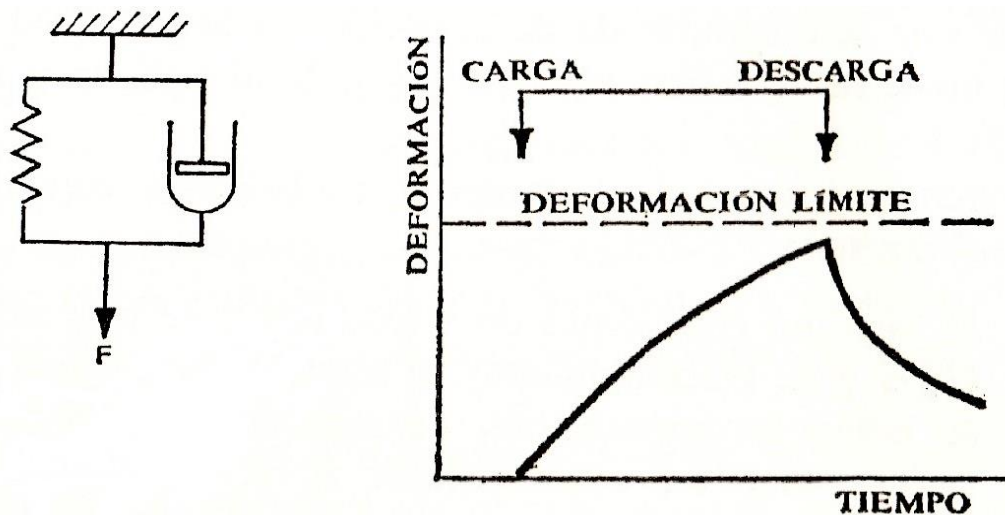


Fig. 2.17, Representación gráfica del modelo de Kelvin-Voigt y su gráfica de deformación-tiempo [2].

Analizando la gráfica deformación-tiempo se puede ver cómo mientras hay aplicada una carga en el material la tensión crece con la deformación de una manera no lineal hasta una deformación límite que depende únicamente de la tensión aplicada. Posteriormente, cuando se retira la carga, se observa una recuperación de la deformación de manera no lineal. Esta recuperación se produce porque el elemento de Hooke comprime lentamente al modelo de Newton, fenómeno que se conoce como elasticidad retardada, y teóricamente el tiempo de recuperación total de la deformación es infinito.

2.3.3. Modelo de Burgers

El modelo de Burgers consiste en unir en serie un modelo de Maxwell y un modelo de Kelvin-Voigt y tiene un amplio uso en la industria alimentaria [2].

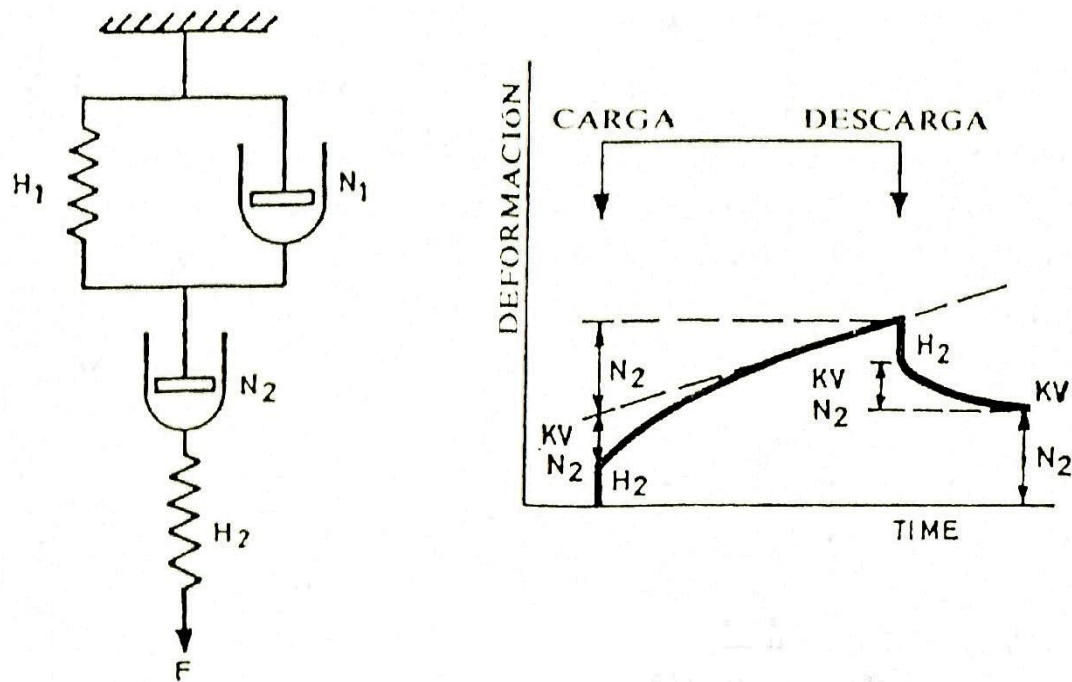


Fig. 2.18. Representación gráfica del modelo de Burgers y su gráfica deformación-tiempo [2].

Aplicando una tensión a este modelo se observa que se produce una deformación inmediata, debida al elemento de Hooke del elemento de Maxwell, seguido de una elasticidad retardada proveniente del elemento de Kelvin-Voigt. Un tiempo después la deformación solo depende del elemento de Newton del elemento de Maxwell, debido a que el elemento de Kelvin-Voigt ha alcanzado la deformación límite. Al retirar la carga se produce una recuperación instantánea debida al elemento de Hooke del elemento de Maxwell y una recuperación retardada debida al elemento Kelvin-Voigt. La recuperación instantánea y la retardada forman la elasticidad total y la deformación restante es debida al elemento viscoso del elemento de Maxwell.

2.4. Ecuaciones de flujos viscosos

A la hora de caracterizar el comportamiento de los flujos viscosos han ido apareciendo diferentes modelos numéricos cada vez más completos y que abarcan un mayor número de fluidos. Los más representativos son los que se muestran a continuación.

2.4.1. Ley de Newton

La ley de Newton para fluidos viscosos es la ecuación 2.1, donde τ es la tensión de cizalladura con unidades de Pa, μ es la viscosidad con unidades de Pa·s y D es la velocidad de deformación con unidades de s^{-1} .

Esta es la primera ecuación que surgió para explicar el comportamiento de un fluido. Actualmente solo es aplicable a los fluidos newtonianos [1].

2.4.2. Ley de potencia

$$\tau = mD^n \quad (2.6)$$

Donde m es el coeficiente de consistencia con unidades de Pas^n y n es el índice de comportamiento del flujo, adimensional. $n=1$ para el caso de un fluido newtoniano, $n > 1$ para un flujo dilatante y $n < 1$ para fluidos pseudoplásticos [1].

2.4.3. Modelo de Bingham

Esta ecuación 2.7 describe el comportamiento de un plástico perfecto.

$$\tau = \mu D + \tau_0 \quad (2.7)$$

Donde τ_0 es el esfuerzo umbral medido en Pa a partir del cual fluye el líquido [1].

2.4.4. Modelo de Herschel-Bulkley

$$\tau = mD^n + \tau_0 \quad (2.8)$$

Es un caso generalizado de la ley de potencia, ecuación 2.6, al que se le ha incluido un esfuerzo umbral para poder representar también el comportamiento de los fluidos plásticos [1].

2.4.5. Modelo de Casson

$$\tau^{0.5} = mD^{0.5} + \tau_0^{0.5} \quad (2.9)$$

En este modelo la curva de tensión de cizalladura frente a velocidad de deformación se convierte en una recta utilizando la raíz cuadrada de la velocidad de deformación y de la tensión de cizalladura.

Se aplica en fluidos que no tiene proporcionalidad entre la tensión de cizalladura y la velocidad de deformación [1].

Capítulo 3 Fluidos Dilatantes o Shear Thickening Fluids

3.1. Introducción y teorías de su comportamiento

Se define a los fluidos dilatantes o shear thickening fluids (STF) como fluidos cuya viscosidad aumenta al a partir de cierto valor de la velocidad de cizalladura. Los shear thickening fluids se caracterizan por una primera fase en la que la velocidad de cizalladura es baja y presentan un comportamiento pseudoplástico o newtoniano, seguido de una segunda región a partir de un valor crítico de la velocidad de cizalladura donde la viscosidad comienza a aumentar con la velocidad de cizalladura. Es esta segunda zona donde se presenta el comportamiento típico de este tipo de fluidos. Por último, hay una zona donde la viscosidad disminuye de manera acusada con la velocidad de deformación, sin embargo, esta zona se debe a que el fluido a velocidades grandes es expulsado del reómetro y se produce un fallo de medición [3].

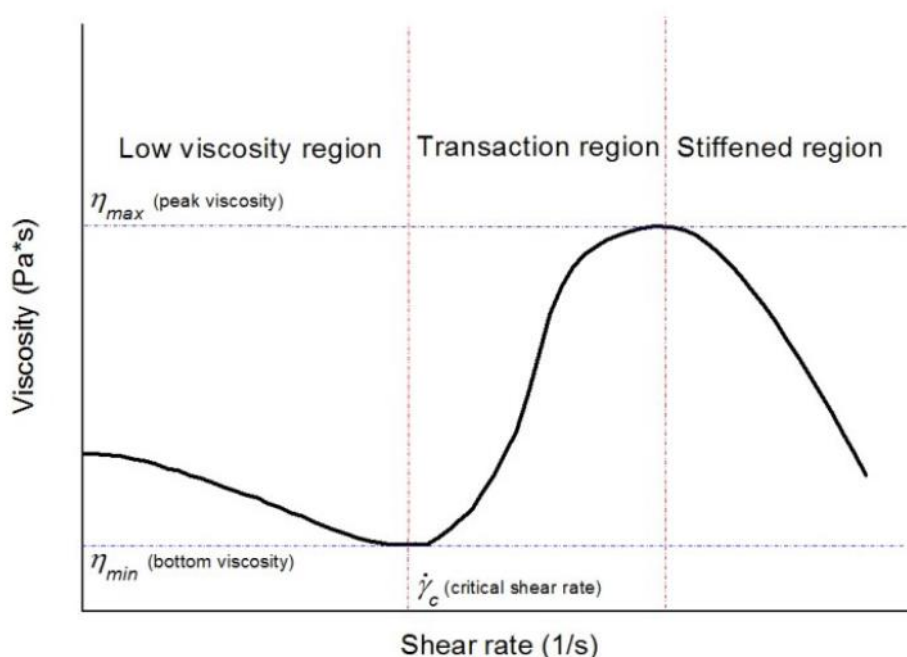


Fig. 3.1. Gráfica de viscosidad para un fluido dilatante [3].

Aunque en un principio se evitaba el uso de este tipo de fluidos por suponer un problema con el tiempo el interés ha ido creciendo gracias a que se ha comprobado su gran capacidad de almacenar energía.

Este tipo de comportamiento se da en suspensiones de sólidos en un líquido, normalmente a partir de un valor de 0.4 para la fracción volumétrica de las partículas sólidas con forma esférica, pero también puede haber fluidos dilatantes que no están formados por suspensiones de sólidos en líquidos como pueden ser los polímeros amorfos que se encuentran en la temperatura de transición vítrea [4].

3.1.1. Teorías de su comportamiento

Se han presentado varios mecanismos que pueden explicar este tipo de comportamiento, los más extendidos son la transición orden-desorden, la formación de hydroclusters o la dilatancia.

3.1.1.1. Transición orden-desorden

Este fue el primer mecanismo propuesto, ya que se observó que en ciertos fluidos la transición entre una microestructura de las partículas en suspensión ordenada en capas a un estado desordenado coincidía en el mismo punto en el que los fluidos comienzan a mostrar un comportamiento dilatante [5-7].

Sin embargo, se ha demostrado que se puede tener un comportamiento dilatante sin que haya una transición orden-desorden [8].

3.1.1.2. Hydroclusters

En esta teoría se afirma que las partículas en suspensión son empujadas unas contra otras hasta que forman los llamados hydroclusters. Para ello las partículas en suspensión deben superar las fuerzas viscosas que les separan de las partículas a su alrededor producidas por el fluido que se encuentra en medio, esto quiere decir que hay una velocidad de deformación mínima a partir de la cual se empiezan a formar los hydroclusters. Hasta que las partículas no se empiezan a unir unas con otras el fluido tiene un comportamiento pseudoplástico o newtoniano dependiendo de la naturaleza del fluido, pero a partir de la formación de hydroclusters la viscosidad aumenta de forma que se produce el comportamiento dilatante.

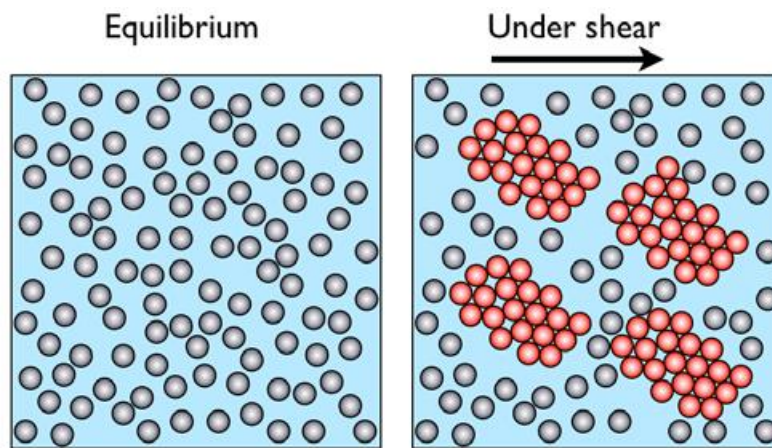


Fig. 3.2. Representación de la formación de hydroclusters bajo cizalladura [9].

Este mecanismo se ha aceptado para explicar el comportamiento de los shear thickening continuos, pero no puede explicar los órdenes de magnitud presentes en los shear thickening discontinuos [4].

3.1.1.3.Dilatancia

La dilatancia es una característica de los fluidos granulares densos donde, bajo la aplicación de una tensión de cizalladura, las partículas tratan de acercarse unas con otras, sin embargo, estas no pueden hacerlo de manera directa y termina aumentando la fracción volumétrica del compuesto.

La dilatancia requiere que se le aplique una tensión de cizalladura que supere las fuerzas entre las partículas en suspensión provocando que se empuje a las partículas contra el contorno. El resultado es que las fuerzas normales se transmiten por el fluido como fuerzas de fricción internas y hace que la viscosidad aumente mucho con la velocidad de cizalla, lo que caracteriza a los fluidos dilatantes discontinuos [4].

3.2.Tipos de STF

Aunque los STF es una categoría de fluidos no newtonianos en los que la viscosidad aumenta al aumentar la velocidad de cizalladura hay una división dentro de esta categoría en función de su comportamiento.

3.2.1. Shear thickening continuo

Los STF normalmente se observan en suspensiones con una fracción volumétrica de alrededor a 0.4, sin embargo, esta fracción puede ser mayor o menor dependiendo del fluido y va a determinar la manera con la que la viscosidad aumenta con la velocidad de cizalladura. Con una baja fracción volumétrica, de entre 0.3 y 0.4, el incremento en la viscosidad de los fluidos es leve, esto es lo que se denomina como shear thickening continuo. Se suele encontrar un valor de la tensión de cizalla mínima, τ_{\min} , a partir del cual se produce el aumento en la viscosidad. Por debajo de este valor el fluido muestra un comportamiento newtoniano o pseudoplástico [4].

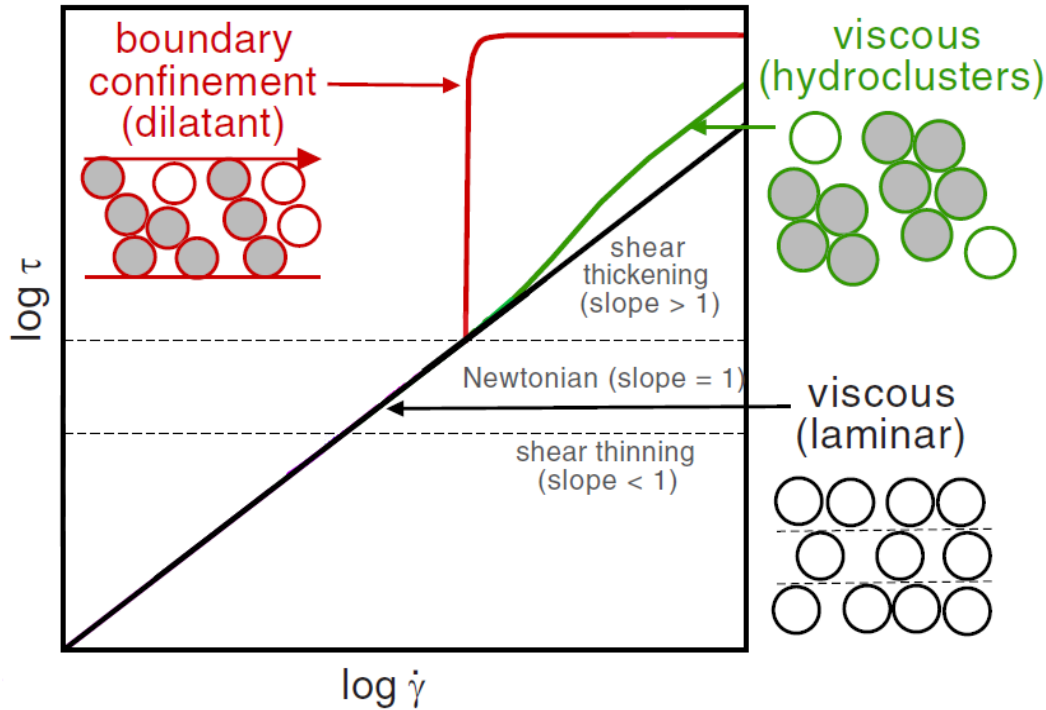


Fig. 3.3. Curvas de fluidez donde se compara los Shear thickening continuos, discontinuos y los fluidos viscosos. Gráfica realizada con la información de [4].

3.2.2. Shear thickening discontinuo

Si se aumenta la fracción volumétrica de las suspensiones el aumento de la densidad con la velocidad de cizalladura es mayor, hasta llegar a un punto en el que la viscosidad aumenta varios ordenes de magnitud por encima de la velocidad de cizalladura. Este es el fenómeno conocido como shear thickening discontinuo o DST por sus siglas en inglés, Discontinuous Shear Thickening.

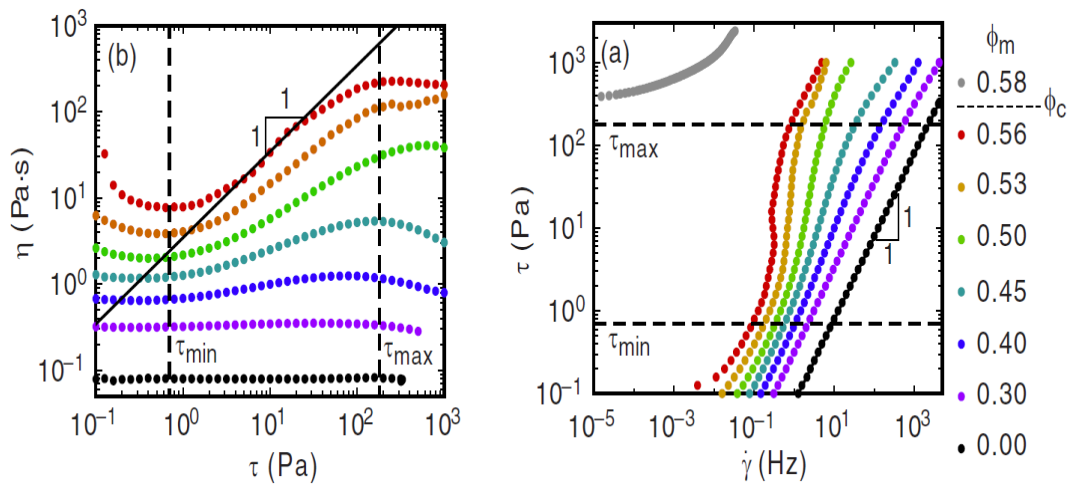


Fig. 3.4. Curvas de viscosidad y fluidez que muestran la evolución de un DST para diferentes fracciones volumétricas [4].

Una propiedad de los DST es que ocurre en un rango de tensiones bien definido que comienza en una tensión mínima, τ_{\min} , independiente de la fracción volumétrica y que coincide con el de los shear thickening continuos. Después de esta tensión mínima se produce el incremento de la viscosidad con la velocidad de cizalladura hasta que se alcanza una tensión máxima, τ_{\max} , a partir de la cual ya no se produce un aumento de la tensión.

Otra característica es que este tipo de fluidos es que este fenómeno solo ocurre por debajo de una determinada fracción volumétrica crítica, ϕ_c , que en suspensiones con partículas esféricas toma un valor en torno a 0.6. Este valor de la fracción volumétrica se corresponde con la transición de interferencia, a partir de la cual el compuesto tiene un límite elástico como si se tratara de un sólido [4].

3.3. Parámetros de control

Hay muchos parámetros que afectan al comportamiento de los STF, algunos dependen de la fase sólida disuelta en el líquido, por ejemplo, la fracción volumétrica, mientras que otros son valores externos al fluido como puede ser la temperatura.

3.3.1. Fracción volumétrica

La fracción volumétrica de una disolución y se representa como el volumen que ocupa la fase sólida frente al tamaño total de la disolución. Una disolución empieza a presentar un comportamiento dilatante a partir de un valor superior a 0.3 de dicha fracción para partículas esféricas. Con el aumento de la fracción volumétrica las partículas sólidas empiezan a interactuar entre ellas. Estas interacciones afectan al comportamiento de la suspensión, de modo que a valores altos de la fracción volumétrica la viscosidad aumenta, y si se sobrepasa cierto valor la dependencia de la viscosidad con la velocidad de cizalladura cambia y se pasa de un shear thickening continuo a uno discontinuo [10].

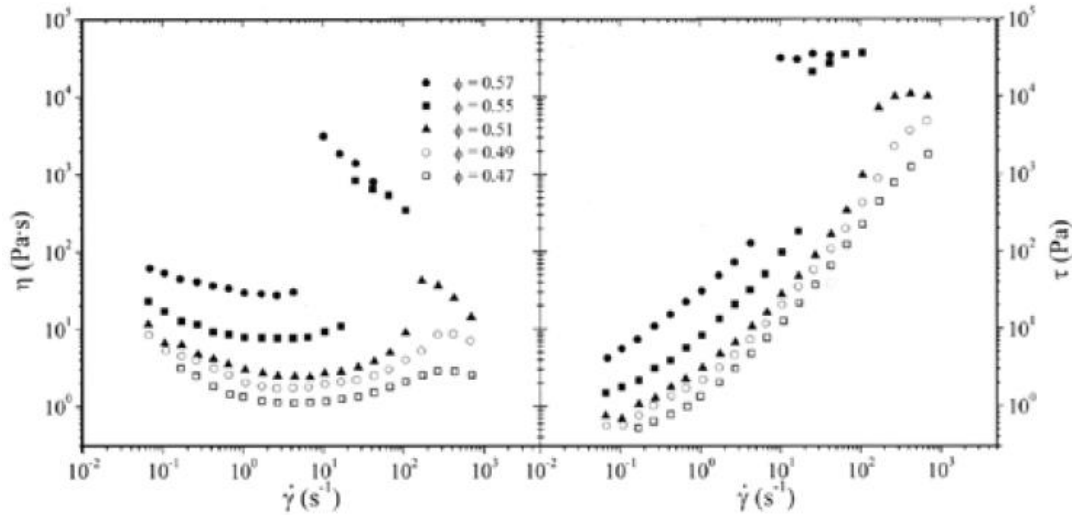


Fig. 3.5. Efecto de la fracción volumétrica en la viscosidad [10].

3.3.2. Tamaño de la partícula

El tamaño de las partículas en suspensión puede variar para una misma fracción másica y el comportamiento de la suspensión también variara en función del tamaño de las partículas. De manera general se puede decir que si se aumenta el tamaño de las partículas disminuye la velocidad de deformación mínima para que se produzca el comportamiento dilatante, sin embargo, se realizaron experimentos donde se mezclaban diferentes tamaños de partículas y se observó que añadiendo partículas de tamaño pequeño a suspensiones de partículas grandes se podía aumentar la fracción volumétrica mientras que el comportamiento dilatante se reducía y aumentaba la velocidad de deformación mínima [11].

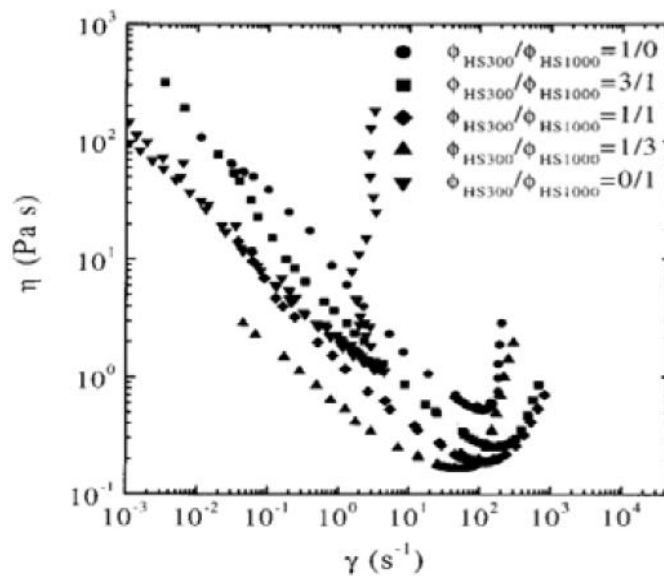


Fig. 3.6. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla para distintos tamaños de partícula [11].

3.3.3. Forma de la partícula

La forma de la partícula puede variar mucho el comportamiento de la viscosidad en una suspensión. Las partículas sin una forma definida tienen un comportamiento dilatante a fracciones volumétricas más pequeñas que las partículas de forma esférica. Esto se creía que era porque las partículas alargadas se desordenaban en la transición a un comportamiento dilatante, sin embargo, experimentos posteriores demostraron que no era así y que se podía mantener el orden de las partículas y presentar un comportamiento dilatante [8].

3.3.4. Temperatura

La temperatura también es otro de los factores que hay que tener muy en cuenta ya que la viscosidad es muy sensible a los cambios de temperatura. En los STF, al igual que en el resto de los fluidos, la viscosidad disminuye de manera muy rápida al aumentar la temperatura. En general, cuanto mayor sea la viscosidad de un líquido mayor será su dependencia de la temperatura, por lo que será muy importante controlar la temperatura a la hora de realizar ensayos.

Se ha intentado determinar la relación de la viscosidad con la temperatura mediante ensayos. Los primeros estudios se centraban en el hecho de que al aumentar la temperatura aumentaba el volumen del líquido, deduciendo que había menos moléculas por unidad de volumen. También parece tener importancia las interacciones intermoleculares de las partículas que dependen de la composición de cada líquido [2].

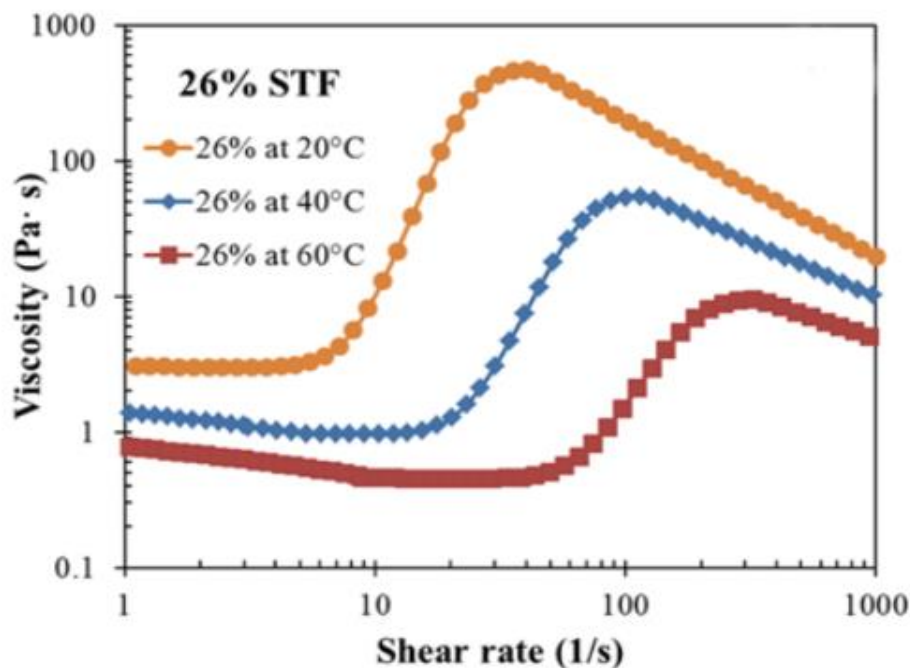


Fig. 3.7. Gráfica de viscosidad para un STF a distintas temperaturas [3].

3.4. Aplicaciones actuales

Se está estudiando la aplicación de los STF en muchos campos debido a su capacidad de absorber energía, por ejemplo, se ha investigado su uso para aplicaciones en naves espaciales [12], en la utilización en estructuras que mejoran la absorción de vibraciones [13], que pueden ser aplicadas a diferentes ámbitos como el equipamiento deportivo o maquinaria industrial [14] o en equipos médicos para limitar el movimiento del paciente [15] También se han utilizado en para crear amortiguadores o embragues [16], pero sin embargo la aplicación más investigada es su utilización para mejorar el rendimiento de chalecos antibalas [9].

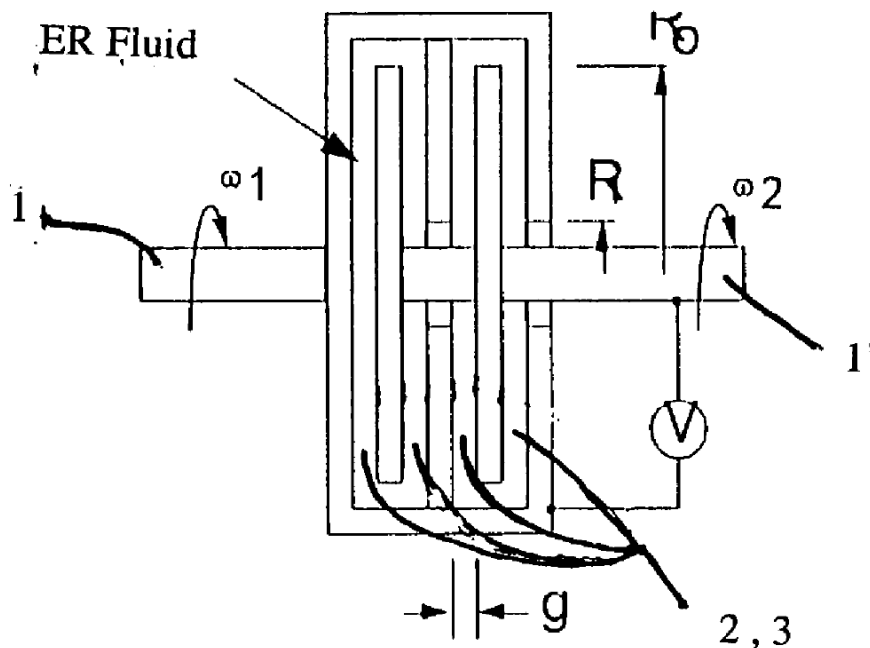


Fig. 3.8. Esquema de un embrague que emplea STF para mejorar su rendimiento [16].

Para poder utilizar STF en un chaleco antibalas se debe mezclar el fluido con etanol, posteriormente impregnar el chaleco de Kevlar en la mezcla del STF y etanol y cuando este saturado introducirlo en un horno, donde el etanol se evaporará y el STF utilizado permanecerá en el Kevlar, dando lugar a lo que se han llamado armaduras líquidas.

El rendimiento de las armaduras líquidas es muy bueno debido a que el STF permite que el chaleco sea más elástico y pueda absorber más energía de modo que el daño que reciba el usuario será menor. En unas pruebas donde se dejaba caer un cuchillo con un determinado peso desde cierta altura contra el chaleco se comprobó que el Kevlar que había sido impregnado en STF era capaz de absorber más energía y era más difícil producir una penetración en él.

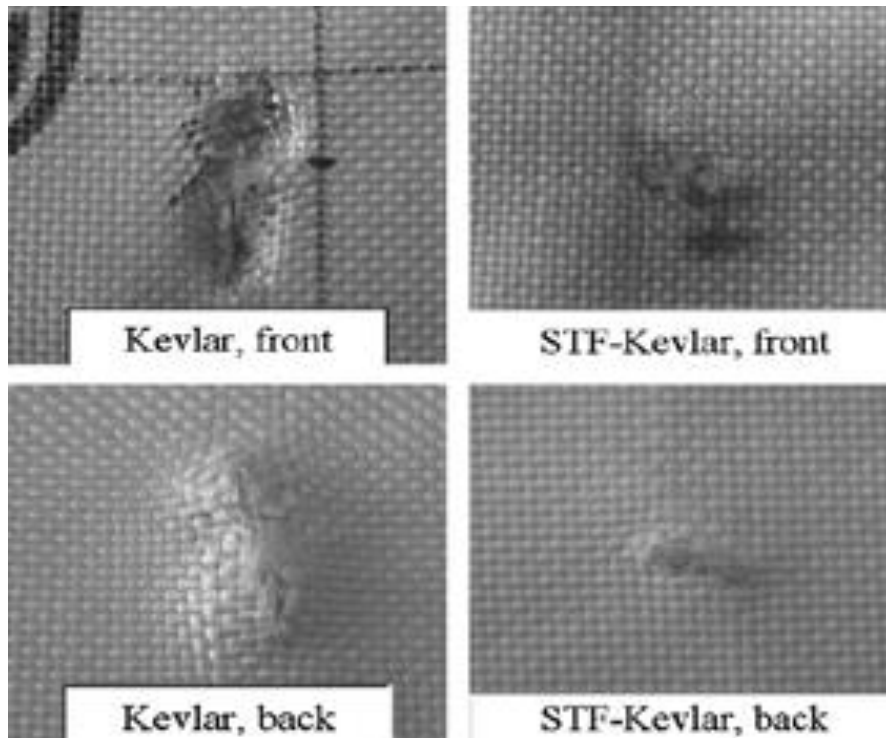


Fig. 3.9. Daño de Kevlar y STF-Kevlar en una prueba de resistencia apuñaladas con una masa de 2.34kg y una altura de 0.75 metros [9].

Sin embargo, aunque estas nuevas armaduras prometen unos buenos resultados en el futuro todavía hay problemas que deben resolverse. Añadir STF hace que sea más difícil transpirar, lo que puede ser incómodo para el usuario, pero también son muy sensibles a la humedad o a la temperatura ya que el STF se puede evaporar y por ello hay que elegir cuidadosamente el fluido que se va a utilizar [9].

Capítulo 4 Ensayos en reómetro

4.1. Historia de reómetros

El reómetro es el aparato que se utiliza para determinar las variables viscoelásticas y la viscosidad de un fluido. El reómetro trabaja relacionando la deformación que sufre el material con la velocidad a la que se deforma. Esta relación se puede realizar de dos maneras, fijando el par que aplica el reómetro al material y midiendo su desplazamiento angular o fijando el desplazamiento angular del material y midiendo el par resistente generado [17].

4.1.1. Tipos de reómetros

Los reómetros se pueden clasificar en función de su funcionamiento y geometría.

4.1.1.1. Reómetro de cilindros concéntricos

La geometría de estos reómetros consiste en un recipiente cilíndrico donde se aloja el líquido y un cilindro que está introducido de forma concéntrica al recipiente y que tiene una velocidad relativa con este. Este segundo cilindro puede tener distintas geometrías en función de la aplicación.

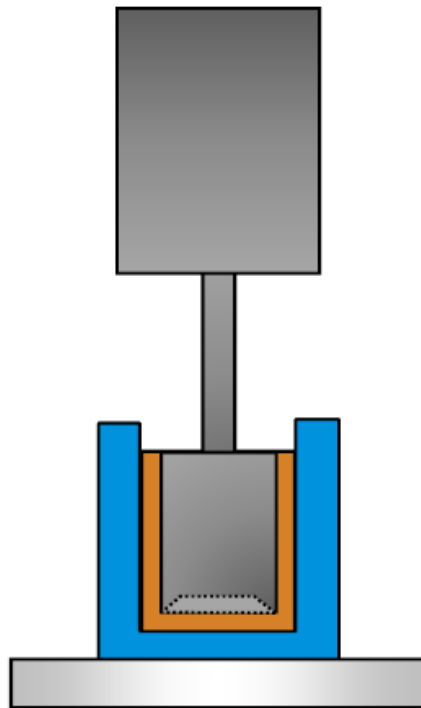


Fig. 4.1. Esquema que muestra la geometría de un reómetro de cilindros concéntricos [17].

Este tipo de reómetros se utiliza para líquidos con viscosidad media y baja, para suspensiones o lodos, cuando se quiere minimizar los efectos de la evaporación, para muestras con una estructura débil y para altas velocidades de deformación.

Están limitados porque se requiere un gran volumen de la muestra [17].

4.1.1.2. Reómetro de doble pared

La geometría de estos reómetros está definida por un recipiente formado por dos cilindros concéntricos y un cilindro hueco que es introducido entre estos cilindros y que tiene un movimiento relativo respecto al recipiente.

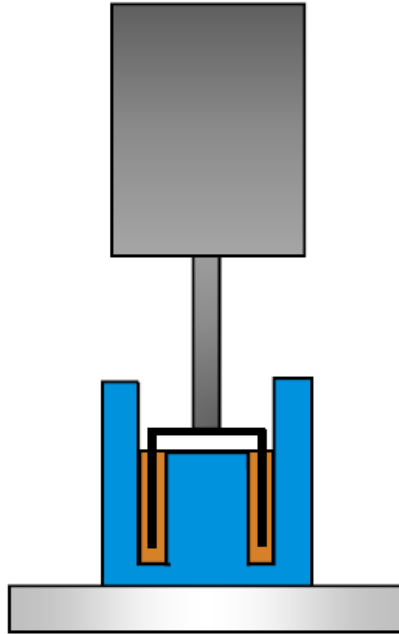


Fig. 4.2. Esquema que muestra la geometría de un reómetro de doble pared [17].

Este tipo de reómetros se utiliza para viscosidades de menos de $1\text{mPa}\cdot\text{s}$, para suspensiones y lodos, para minimizar los efectos de la evaporación, para muestras con una estructura débil y para altas velocidades de cizalladura.

El mayor inconveniente de este tipo de reómetros es su limpieza [17].

4.1.1.3. Reómetros de platos paralelos

Este tipo de reómetros consta de dos platos entre los que se introduce la muestra y que realizan un movimiento relativo entre ellos. La geometría de los platos puede ser distinta dependiendo del punto que se quiera evaluar, por ejemplo, disminuyendo el radio se puede aumentar la tensión de cizalladura o disminuyendo la separación entre platos se aumenta la velocidad de cizalladura.

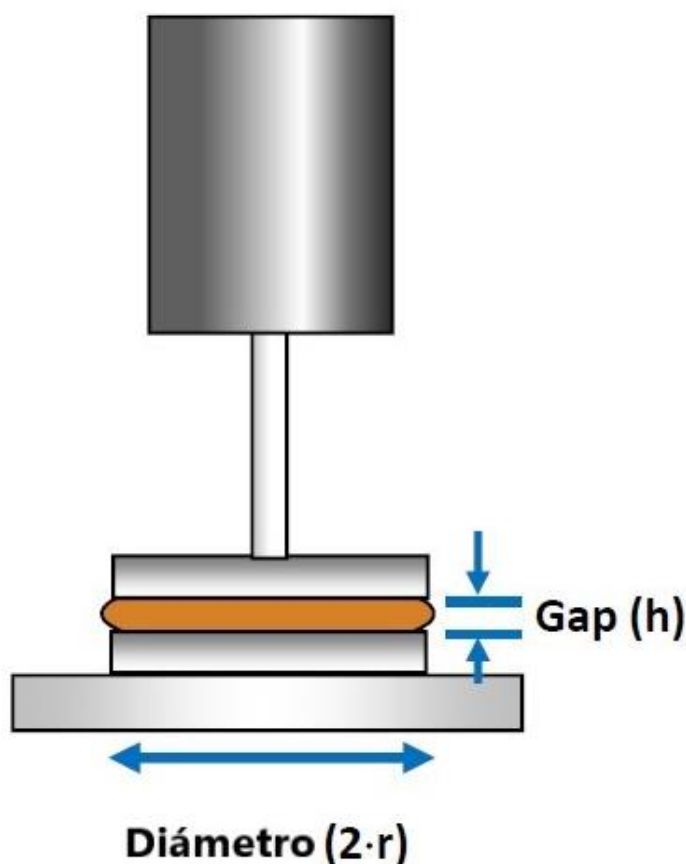


Fig. 4.3. Esquema que muestra la geometría de un reómetro de platos paralelos [17].

Este tipo de reómetros se utiliza para líquidos con viscosidades bajas, medias o altas, para geles, muestras con partículas largas, muestras con un tiempo de relajación alto para hacer ensayos de rampa de temperatura, para muestras de volumen pequeño y para materiales termoendurecibles.

Un problema de este tipo de reómetros es que la deformación no es constante para toda la muestra, ya que, aunque toda la muestra gire el mismo ángulo para radios mayores la deformación será mayor y hay que tenerlo en cuenta [17].

4.1.1.4. Reómetros de cono y plato

Este tipo de reómetros está formado por un plato que se encuentra a una cierta distancia de un cono y tienen un movimiento relativo entre ambos. La punta del cono está truncada y la geometría de las piezas depende de los puntos que se desea estudiar, por ejemplo, disminuyendo el diámetro se incrementa la velocidad de cizalladura o disminuyendo el ángulo del cono se aumenta la velocidad. La distancia mínima entre el plato y cono, llamada gap, debe ser igual o mayor a diez veces el tamaño de la partícula de la muestra que se está estudiando.

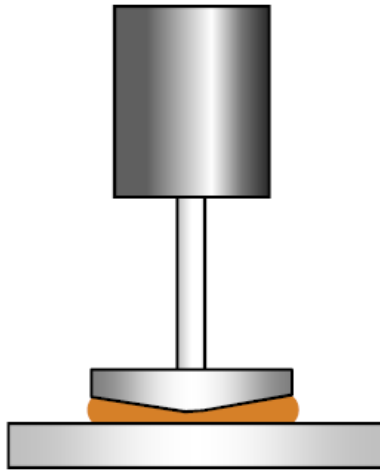


Fig. 4.4. Esquema que muestra la geometría de un reómetro de plato y cono [17].

Este tipo de reómetros se usa para líquidos en un amplio rango de viscosidades, para test a temperatura constante, para muestras de pequeño volumen, para ensayos a altas velocidades de cizalladura y para ensayos donde la tensión normal crece.

Este tipo de reómetros soluciona el problema de los reómetros de platos paralelos en los que la deformación aumentaba con el radio gracias al ángulo del cono, pero se debe de tener cuidado con la cantidad de muestra que se quiere ensayar y es difícil realizar ensayos de prueba de temperatura [17].

4.1.1.5.Reómetros rotacionales

Este tipo de reómetros está formado por dos anclajes donde se introduce la muestra sólida que se va a torsionar.

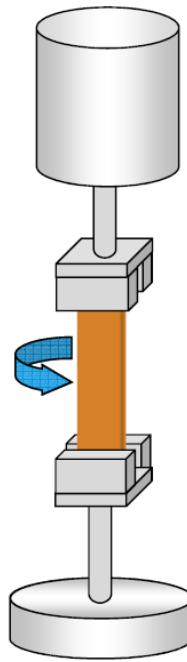


Fig. 4.5. Esquema que muestra la geometría de un reómetro de torsión rectangular [17].

La ventaja de estos reómetros es que las muestras pueden tener un módulo de cizalladura alto, es válido para pequeños gradientes de temperatura y es simple de preparar. Su desventaja es que está limitado por la dureza de la muestra y que no aplica torsión pura para altas deformaciones [17].

4.2. Ensayos rotacionales

Los ensayos rotacionales son un tipo de ensayo en los que se aplica una tensión o una deformación que puede ser variable aun material haciendo girar al reómetro en una dirección para determinar sus características.

En este tipo de ensayos hay que tener ciertas consideraciones para que el resultado sea correcto. Si el gap de la muestra es muy pequeño se producirán tensiones muy altas, se recomiendan gaps de entre 0.5 a 2 milímetros. Hay que tener cuidado con la interpretación de los datos a bajas velocidades de deformación debido a que la tensión superficial puede afectar a la medida de la viscosidad. También es posible que la muestra abandone el gap debido a las fuerzas normales a las que está sometida, una posible solución a esto es usar un gap o un ángulo menor que permita tener la misma velocidad de deformación para una velocidad angular menor [17].

4.2.1. Ensayos a tensión o velocidad de cizalla constante

Este tipo de ensayos consiste en mantener constante la tensión o la velocidad de deformación aplicada al fluido. Sirve para estudiar un punto en concreto o para estudiar la importancia del tiempo en estado estacionario para una cierta tensión o velocidad de cizalla [17].

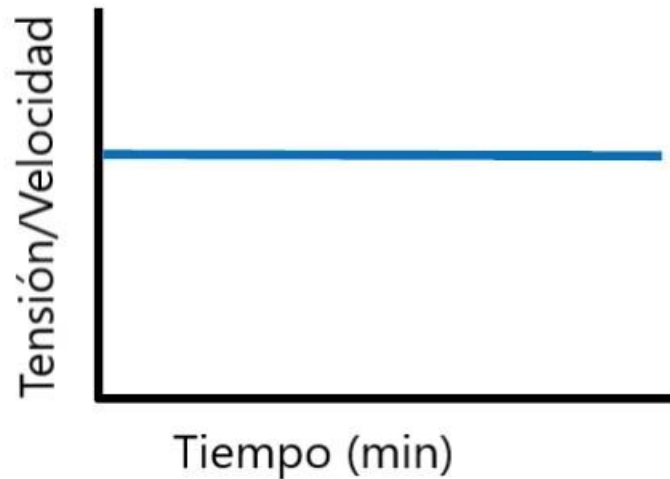


Fig. 4.6. Gráfica de tensión o velocidad de cizalla frente al tiempo para un ensayo a tensión o velocidad de cizalla constante [17].

4.2.2. Ensayos de incremento de tensión constante

En este ensayo se incrementa de manera continua la tensión y se estudia la variación de la deformación con el tiempo. Se utiliza para determinar el límite elástico del material y para estudiar la variación de la viscosidad [17].

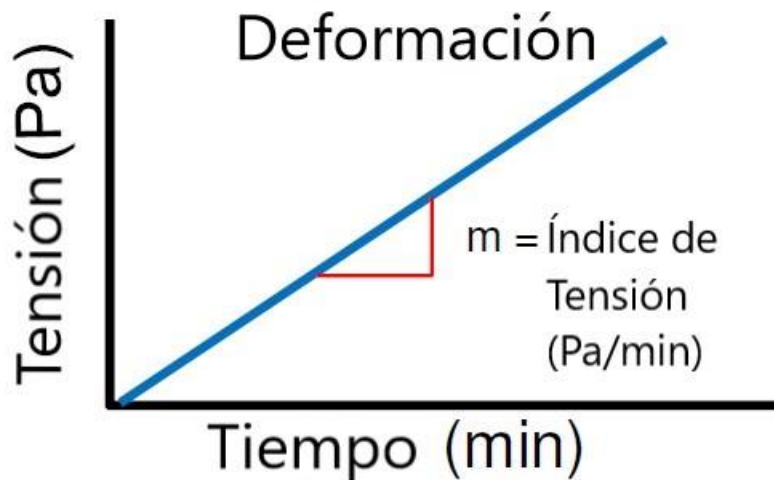


Fig. 4.7. Gráfica de incremento de la tensión frente al tiempo para un ensayo de incremento de tensión constante [17].

4.2.3. Ensayos de incremento y reducción constante de tensión

En los ensayos de incremento y reducción constante de tensión se incrementa la tensión de manera continua hasta un cierto valor y luego se reduce de manera constante hasta el valor original mientras se monitoriza la deformación frente al tiempo.



Fig. 4.8. Gráfica de la variación de tensión frente al tiempo para un ensayo de incremento y reducción constante de tensión [17].

Este ensayo se realiza para hacer ciclos de histéresis y estudiar la tixotropía del fluido [17].

4.2.4. Ensayos de fluido escalonado o flujo estacionario

En este tipo de ensayos se aplica una tensión o una deformación constantes a un fluido hasta que se consigue un flujo estacionario. Cuando se consigue el flujo estacionario se hace una medición de la viscosidad y se incrementa logarítmicamente la tensión o la deformación y se repite el proceso.



Fig. 4.9. Gráfica que muestra la tensión o la deformación para un ensayo de flujo escalonado [17].

Este tipo de ensayos se usa para obtener las curvas de viscosidad del fluido y para obtener el límite elástico del material [17].

4.2.5. Ensayos de incremento de temperatura

En estos ensayos se mantiene constante la tensión o la velocidad de cizalla mientras se incrementa de forma constante la temperatura y se utiliza para medir la variación de la viscosidad con la temperatura [17].

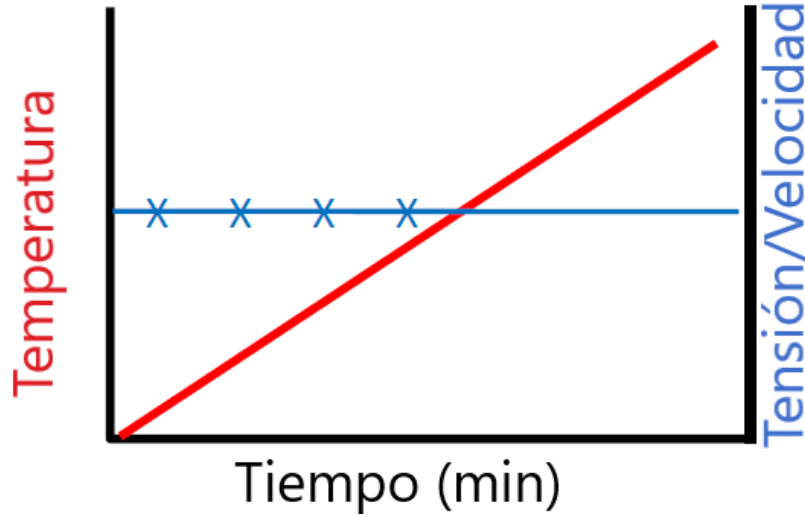


Fig. 4.10. Gráfica que representa el incremento de temperatura y la tensión o velocidad de cizalla para un ensayo de incremento de temperatura [17].

4.3. Ensayos oscilatorios

En los ensayos oscilatorios se aplica un par sinusoidal a la muestra, la muestra responde y se obtiene la respuesta en forma de desplazamiento angular a partir de la cual se puede obtener la representación de la deformación y la tensión.

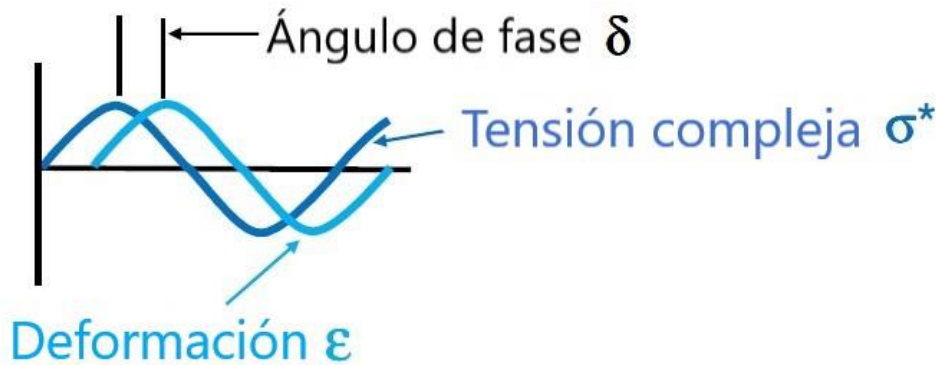


Fig. 4.11. Gráfica obtenida en un ensayo oscilatorio [17].

La deformación sinusoidal puede expresarse de forma matemática como

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t) \quad (4.1)$$

Donde ε_0 es la amplitud de la deformación y ω la frecuencia de oscilación en radianes por segundo.

La tensión resultante de aplicar esta deformación al fluido según la fórmula 4.2.

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (4.2)$$

Dónde σ_0 es la amplitud de la tensión medida en pascales y el ángulo de fase δ entre la tensión y la deformación.

Si este ángulo es 0° el material tiene un comportamiento elástico ideal mientras que si es un ángulo de 90° la muestra presenta el comportamiento de un fluido viscoso ideal. Si el ángulo se encuentra entre estos valores la muestra tiene un comportamiento viscoelástico [18].

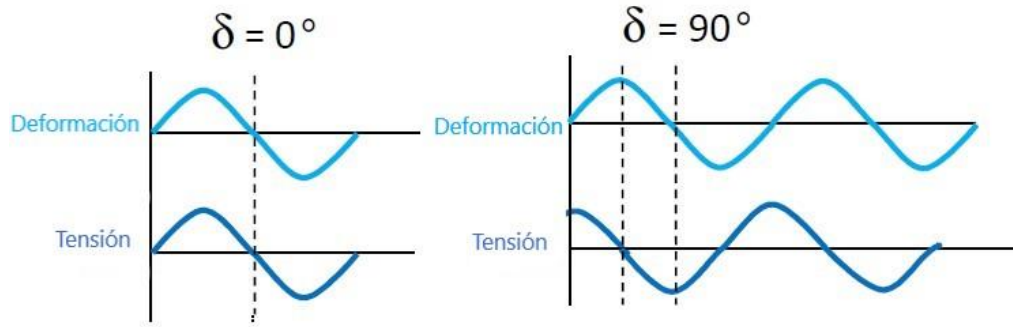


Fig. 4.12. Gráfica para un ensayo rotacional para un comportamiento elástico perfecto (ángulo de fase igual a 0°) y para un comportamiento viscoso (ángulo de fase 90°) [17].

Esta tensión se puede descomponer a su vez en dos componentes empleando números complejos, una componente en fase, σ' , y una componente fuera de fase, σ'' .

$$\sigma^* = \sigma' + i\sigma'' \quad (4.3)$$

En la ecuación 4.3 σ^* es la tensión compleja e i es la raíz cuadrada de -1.

σ' representa la tensión elástica que está en fase con la deformación y es una medida del comportamiento elástico del material.

$$\sigma' = \sigma^* \cos \delta \quad (4.4)$$

Por otra parte, σ'' es la tensión viscosa en fase con la deformación, y representa el comportamiento viscoso del material. Se puede obtener σ'' con la ecuación 4.5.

$$\sigma'' = \sigma^* \sin \delta \quad (4.5)$$

También se obtiene un módulo de rigidez complejo, medido en pascales en el Sistema Internacional de Unidades, que indica la resistencia del material a deformarse y se define como la tensión compleja entre la deformación del material. Este módulo de rigidez complejo se puede dividir a su vez en dos módulos de rigidez distintos, G' y G'' . G' es el módulo elástico e indica la capacidad del material para almacenar energía, y se define con la fórmula 4.6.

$$G' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta \quad (4.6)$$

G'' es el módulo viscoso del material y muestra la capacidad del material a disipar energía. Su fórmula es la ecuación 4.7.

$$G'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta \quad (4.7)$$

El módulo complejo se puede obtener como suma del módulo elásticos y del módulo viscoso.

$$G^* = G' + iG'' \quad (4.8)$$

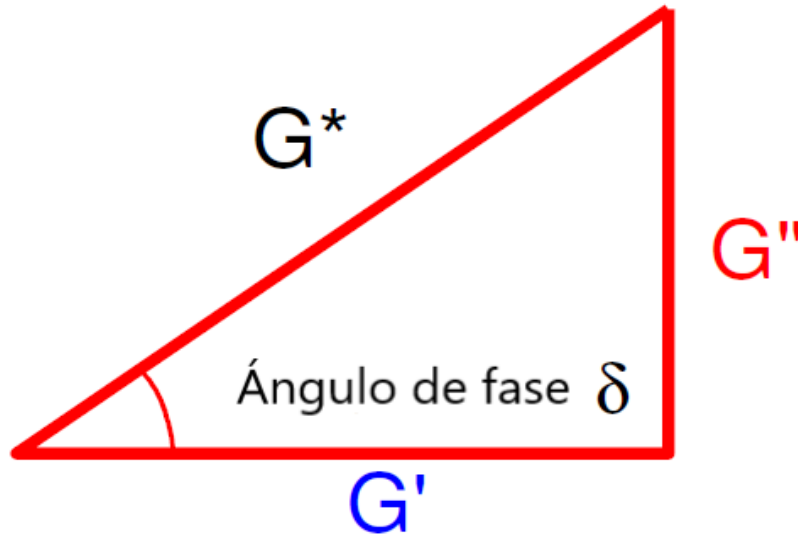


Fig. 4.13. Representación del módulo complejo, el módulo elástico y el módulo viscoso como vectores [17].

La viscosidad obtenida en un ensayo oscilatorio es una viscosidad compleja que puede ser expresada en función del módulo de rigidez complejo.

$$\eta^* = \frac{G''}{\omega} - i \frac{G'}{\omega} \quad (4.9)$$

Donde ω es la frecuencia a la que se hace el ensayo oscilatorio en radianes por segundo y G' el módulo elástico y G'' .

La viscosidad compleja también se puede dividir en una componente elástica, η'' , y otro parámetro que es la viscosidad dinámica, η' [17].

$$\eta^* = \eta' + i\eta'' \quad (4.10)$$

4.3.1. Tipos de ensayos rotacionales

Hay diferentes tipos de ensayos rotacionales dependiendo de lo que se desee estudiar o de la muestra a estudiar.

4.3.1.1. Ensayos rotacionales de deformación dinámica

Los ensayos rotacionales de deformación dinámica se realizan con una amplitud de deformación creciente manteniendo la frecuencia y la temperatura constante

asegurándose de que la muestra es estable, asumiendo que la muestra es estable para determinar las propiedades viscoelásticas en la zona lineal [17].

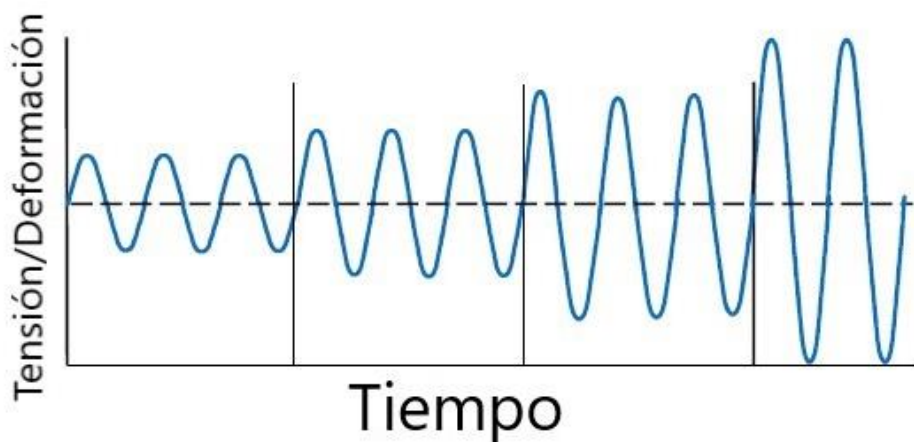


Fig. 4.14. Gráfica de un ensayo oscilatorio de deformación dinámica [17].

4.3.1.2. Ensayos rotacionales de barrido de tiempo

En fluidos dependientes del tiempo de aplicación y en estudios para estudiar la degradación térmica se mantiene constante la frecuencia, la temperatura y la amplitud.

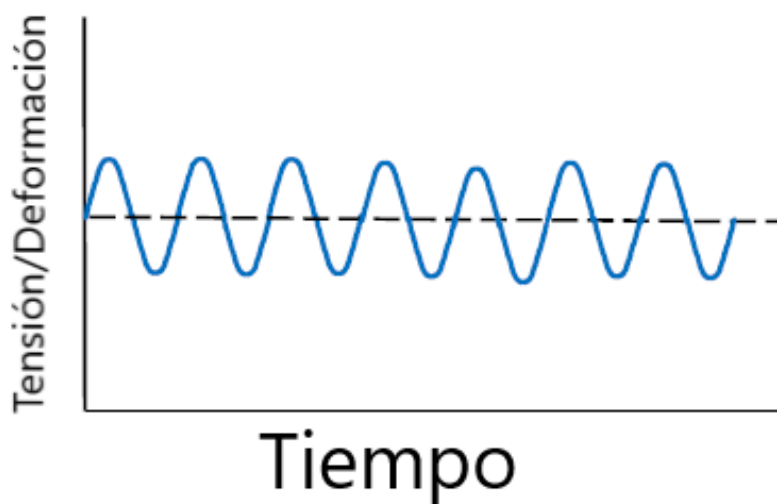


Fig. 4.15. Gráfica de un ensayo rotacional de barrido de tiempo [17].

Es importante para determinar si las propiedades del fluido varían con el tiempo durante el que se realiza el ensayo [17].

4.3.1.3. Ensayos rotacionales de barrido de frecuencia

Se somete al material a una frecuencia creciente con una temperatura y una amplitud constante. La muestra debe ser estable y debe hacerse el ensayo en la zona viscoelástica lineal.

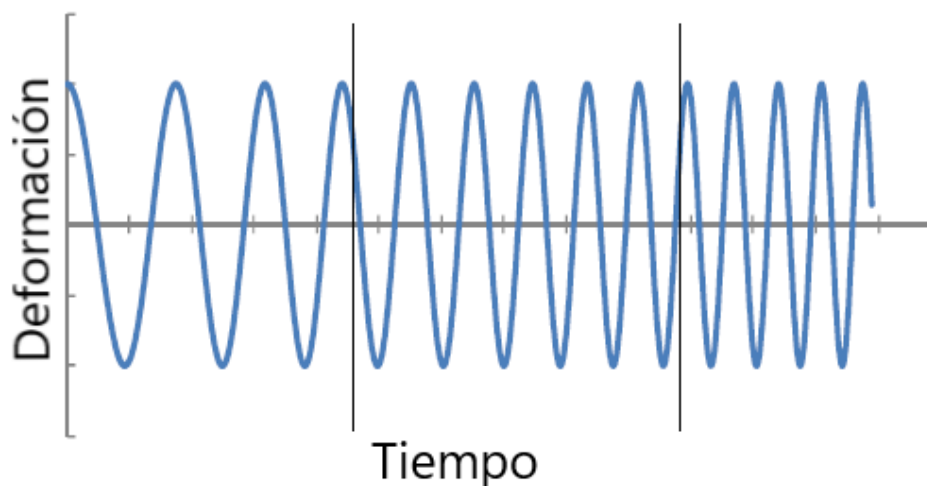


Fig. 4.16. Gráfica de un ensayo rotacional de barrido de frecuencia dinámica [17].

Este ensayo da resultados sobre la elasticidad en los materiales, sus propiedades a altas y bajas velocidades e información sobre su viscosidad [17].

4.3.1.4. Ensayo de rampa de temperatura

Se aplica una temperatura creciente de manera lineal con el tiempo al material mientras se mantiene la frecuencia y la amplitud constante y se toman datos en intervalos de tiempo definidos [17].

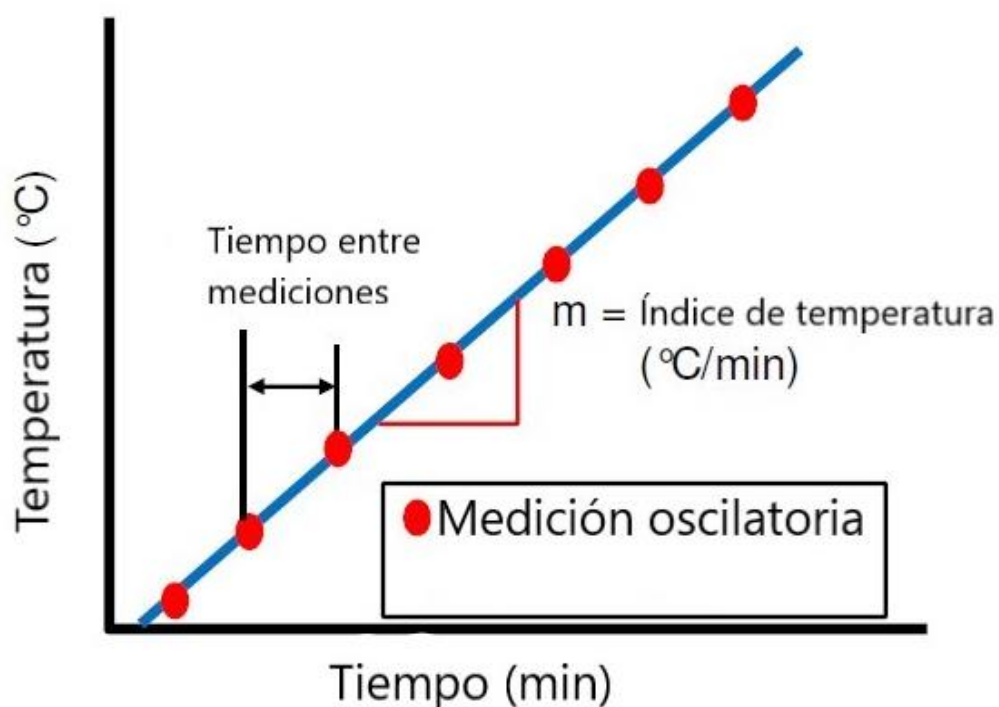


Fig. 4.17. Gráfica que muestra el aumento de la temperatura con el tiempo en un ensayo rotacional de rampa de temperatura [17].

4.3.1.5. Ensayo de salto de temperatura

Se aplica al material a saltos de temperatura que luego se mantienen con el tiempo, la amplitud debe ser constante pero la amplitud puede ser constante o variable [17].

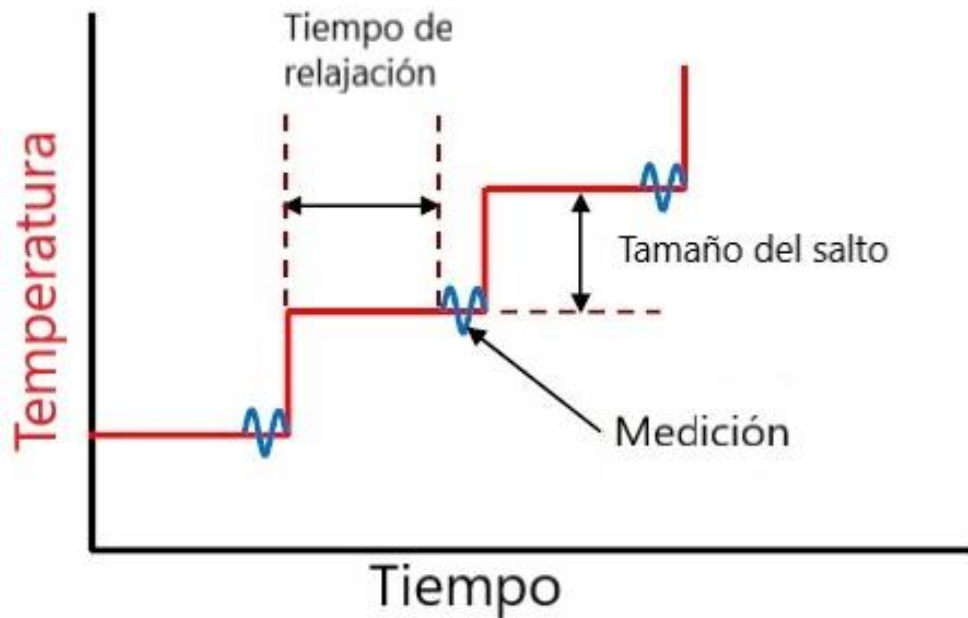


Fig. 4.18. Representación de la variación de la temperatura con el tiempo en un ensayo oscilatorio de salto de temperatura [17].

Capítulo 5 Metodología de ensayo

5.1. Mezclado del material

En primer lugar, se va a realizar el mezclado del material con el que se va a realizar los ensayos. El material empleado será Propilenglicol al que se le añadirán partículas de sílice para que actúen como una suspensión. Se van a realizar diferentes muestras con fracciones másicas del 7.5 por ciento, 10 por ciento, 12.5 por ciento y del 15 por ciento. La fracción másica de una suspensión se calcula con la fórmula 5.1.

$$\text{Fracción másica (\%)} = \frac{\text{masa soluto}}{\text{masa soluto} + \text{masa disolvente}} \quad (5.1)$$

Una vez que se sabe la masa de soluto y de disolvente que se debe emplear en la disolución se debe realizar el mezclado. Para realizar el mezclado se debe ir añadiendo lentamente hasta llegar a la masa requerida las partículas de sílice al Propilenglicol sin dejar de remover fuertemente la mezcla, ya que si no se remueve la mezcla en todo momento está puede espesar y por tanto deja de ser una mezcla viable con la que realizar los ensayos.

5.2. Protocolo de ensayos

Para realizar el ensayo se va a utilizar un reómetro de platos paralelos de 25mm de diámetro y se va a realizar dos tipos de ensayos, un ensayo rotacional en el que se irá incrementando la velocidad de cizalla y realizando mediciones en la tensión de la muestra y un ensayo oscilatorio donde se incrementará la amplitud de la tensión manteniendo la frecuencia de giro constante en 15 Hz. Los ensayos se realizaron en las instalaciones del instituto IMDEA de materiales en Getafe.

El reómetro utilizado es capaz de detectar gaps de 4μm o superiores y es capaz de operar para un límite inferior de torque de 10μN·m y un límite inferior de velocidad del fluido de 1·10⁻³ rad/s. Los ensayos rotatorios se han hecho con unas velocidades de cizalla de entre 0.1 s⁻¹ y 1000 s⁻¹. En los ensayos oscilatorios se ha definido un límite de giro de 170° y un límite de torque de 5μN·m.

El reómetro controla tres parámetros, el torque, el desplazamiento angular de la muestra y la velocidad de giro y obtiene variables como la tensión de cizalladura o la velocidad de cizalla en función de la geometría empleada. Para un reómetro en el que se emplean platos paralelos las distintas variables de interés son las siguientes:

$$\tau = K_{\sigma} M \quad (5.2)$$

$$\gamma = K_{\gamma} \theta \quad (5.3)$$

$$\dot{\gamma} = K_{\gamma} \Omega \quad (5.4)$$

Donde M es el par aplicado, θ el desplazamiento angular de la muestra, Ω la velocidad de giro de los platos, K_σ y K_γ son las constantes de tensión y

deformación respectivamente, que en un reómetro de platos paralelos se pueden obtener de la siguiente manera:

$$K_{\sigma} = \frac{2}{\pi R^2} \quad (5.5)$$

$$K_{\gamma} = \frac{R}{H} \quad (5.6)$$

Siendo R el radio de los platos y H el gap, la distancia que hay entre los dos platos.



Fig. 5.1. Muestra sometida a un ensayo en reómetro.

Los ensayos se realizarán sobre las distintas muestras de Propilenglicol con partículas de sílice preparadas antes a distintas temperaturas y presión atmosférica. Los ensayos se harán a cinco temperaturas distintas, empezando por 25°C e incrementando 10°C en cada ensayo hasta llegar a 65°C. La temperatura de la muestra se controlará gracias a una resistencia eléctrica colocada en la parte inferior del reómetro.

Antes de cada ensayo se debe realizar una calibración del reómetro. Esta calibración consiste en una corrección del centro de giro de los platos y la distancia entre platos. Para calibrar la distancia entre platos, se hace descender al reómetro lentamente hasta que los dos platos entran en contacto. Para calibrar el centro de giro de los platos se hace que estos giren en el vacío y se calculan las inercias que generan.

También se debe someter a la muestra a una pequeña precarga para asegurarse de que todas las muestras parten del mismo historial de tensiones y que por tanto los resultados obtenidos son válidos. Después de cada ensayo se debe volver a ajustar el gap ya que puede variar el volumen de la muestra empleado.

Cuando se vaya a cambiar la muestra a ensayar se reemplazarán los platos y se colocarán unos nuevos donde colocar la nueva muestra. Los platos que han sido utilizados deben limpiarse con etanol para asegurarse de que la muestra ensayada ha sido completamente eliminada y así se podrán utilizar en un futuro sin afectar al resultado.

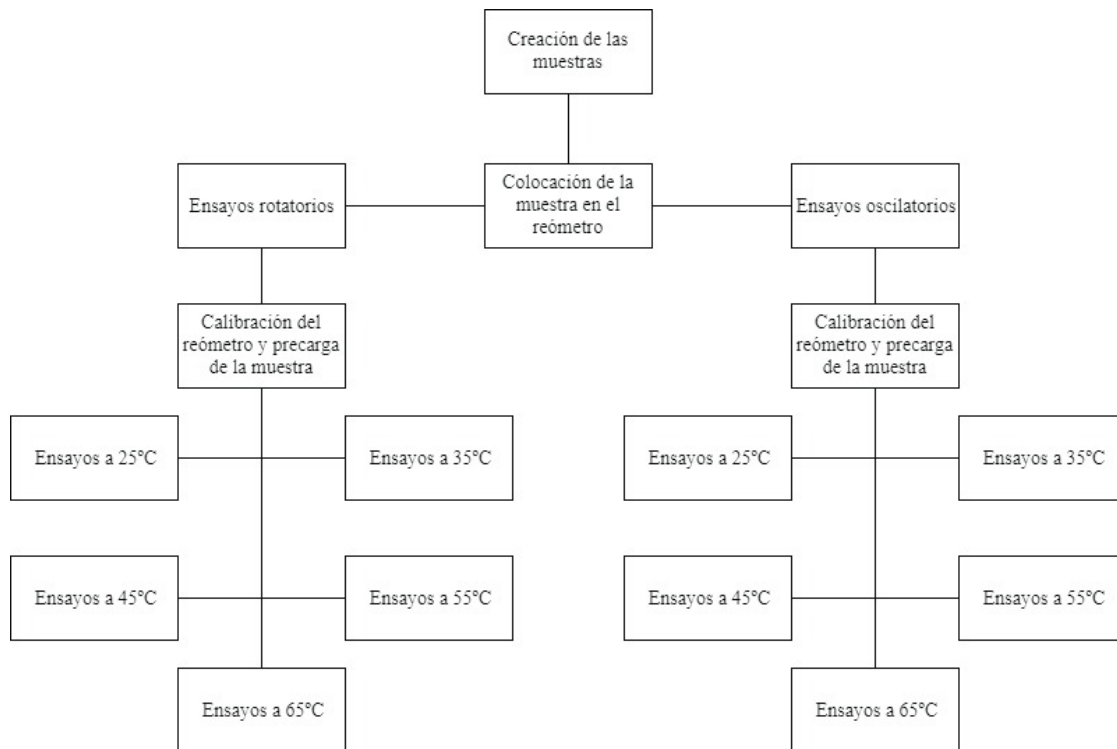


Fig. 5.2. Diagrama del proceso seguido durante los ensayos.

Capítulo 6 Resultados

6.1. Resultados de los ensayos rotacionales

A continuación, se van a mostrar los resultados obtenidos para las distintas muestras en los ensayos rotacionales realizados. Los ensayos rotacionales que se han realizado son ensayos de incremento de tensión constante a presión atmosférica, ya que estos ensayos son los que permiten estudiar la variación de la viscosidad con la velocidad de cizalladura.

6.1.1. Resultados obtenidos para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento

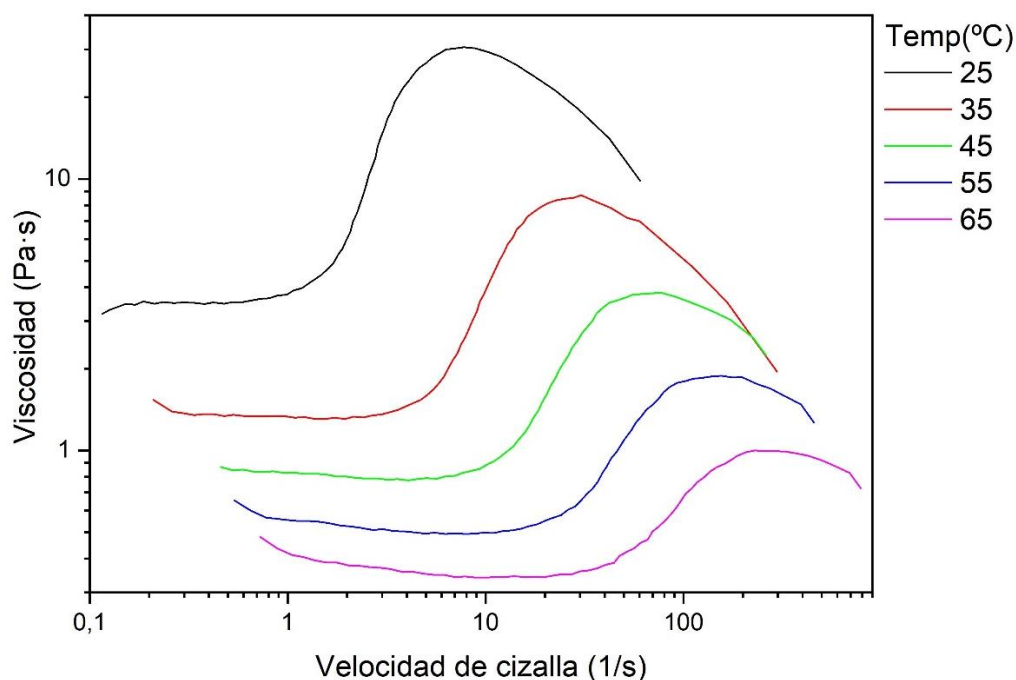


Fig. 6.1. Curva de viscosidad para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 7.5 por ciento a diferentes temperaturas.

En la figura 6.1. se puede observar las curvas de viscosidad para el ensayo de incremento de tensión constante para la muestra de propilenglicol con una fracción másica del 7.5 por ciento. En esta figura se puede observar como varía la viscosidad para las distintas temperaturas, y como se comentó anteriormente, la viscosidad disminuye con la temperatura.

El valor de las viscosidades a las que se inicia el comportamiento dilatante son de 3.96 Pa·s en el ensayo a 25 grados, 1.41 Pa·s en el ensayo a 35 grados, 1.04 Pa·s en el ensayo a 45 grados, 0.6 Pa·s en el ensayo a 55 grados y 0.41 Pa·s en el ensayo a 65 grados.

El valor máximo de la viscosidad obtenida durante estos ensayos es de 30.54 Pa·s en el ensayo a 25 grados, 8.7 Pa·s en el ensayo a 35 grados, 3.82 Pa·s para el ensayo a 45 grados, 1.89 Pa·s en el ensayo a 55 grados y 0.99 Pa·s en el ensayo a 65 grados.

La velocidad de cizalla a la que comienza el comportamiento dilatante en estos ensayos es de 1.18 s^{-1} en el ensayo a 25 grados, 3.62 s^{-1} para el ensayo a 35 grados, 13.85 s^{-1} en el ensayo a 45 grados, 26.03 s^{-1} en el ensayo a 55 grados y 47.45 s^{-1} para el ensayo a 65 grados.

Por otra parte, la velocidad de cizalla a la que termina el comportamiento dilatante en estos ensayos es de 7.79 s^{-1} para el ensayo a 25 grados, 30.49 s^{-1} para el ensayo a 45 grados, 76.94 s^{-1} para el ensayo a 55 grados, 155.44 s^{-1} para el ensayo a 65 grados y 290.3 s^{-1} para el ensayo a 65 grados.

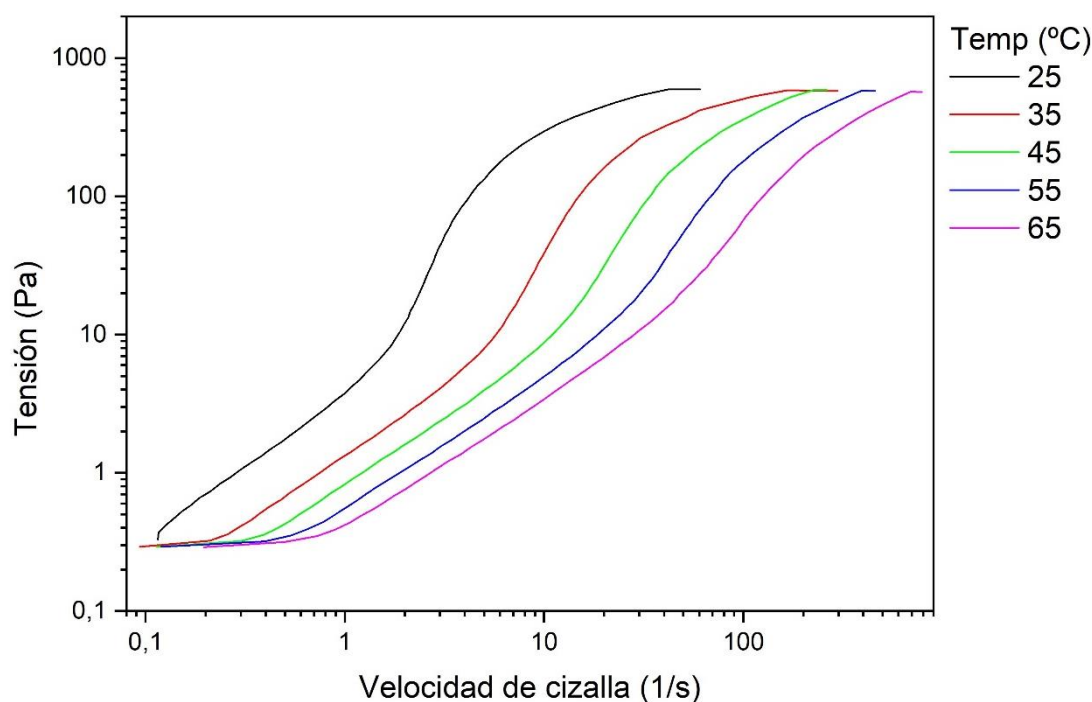


Fig. 6.2. Curva de fluidez para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 7.5 por ciento a diferentes temperaturas.

La figura 6.2. muestra la curva de fluidez de los ensayos realizados a la muestra de propilenglicol con una fracción másica del 7.5 por ciento. En la curva de fluidez, figura 6.2 se puede observar como la temperatura retrasa la aparición del efecto dilatante, sin embargo, la temperatura no aumenta excesivamente la tensión a la que comienza a aparecer este efecto.

Las tensiones a la que aparece el efecto dilatante en los ensayos realizados en las muestras con una fracción másica del 7.5 por ciento son 4.68 Pa en el ensayo a 25 grados, 5.11 Pa en el ensayo a 35 grados, 14.36 Pa en el ensayo a 45 grados, 15.71 Pa en el ensayo a 55 grados y 19.4 Pa en el ensayo a 65 grados.

6.1.2. Resultados obtenidos para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento

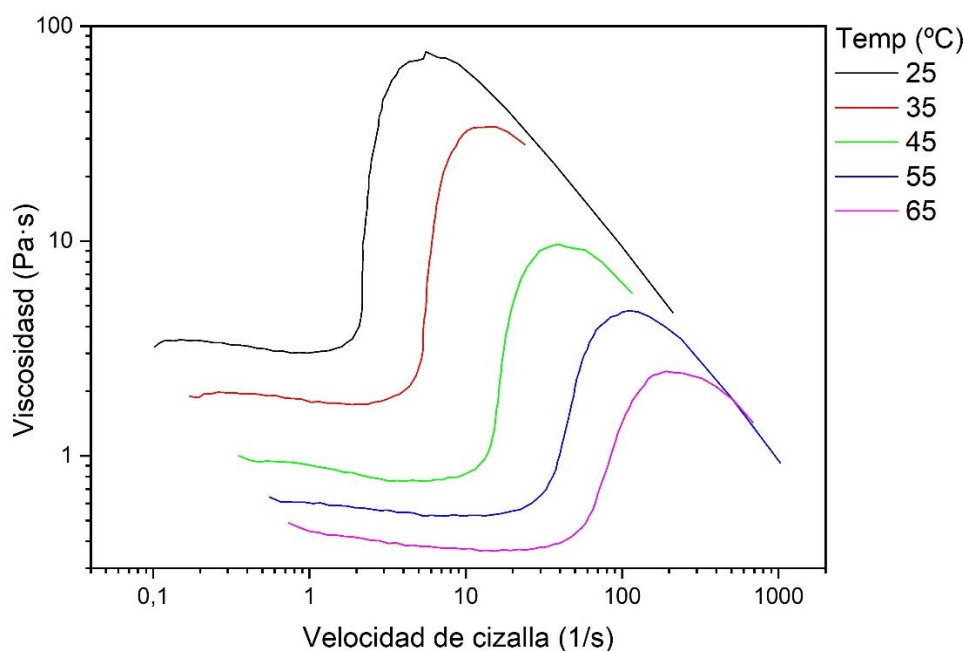


Fig. 6.3. Curva de viscosidad para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 10 por ciento a diferentes temperaturas.

En la figura 6.3 se pueden ver la curva de viscosidad para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica de 10. En la curva de viscosidad se puede ver cómo se repite el fenómeno comentado anteriormente, el ensayo realizado con una menor temperatura muestra una viscosidad mayor que los ensayos a otras temperaturas.

Las viscosidades a las que comienza el comportamiento dilatante en los ensayos a esta muestra son de 3.5 Pa·s en el ensayo a 25 grados, 1.89 Pa·s en el ensayo a 35 grados, 0.87 Pa·s en el ensayo a 45 grados, 0.75 Pa·s en el ensayo a 55 grados y 0.47 Pa·s en el ensayo a 65 grados.

Las viscosidades máximas durante los ensayos realizados a estas muestras son 76 Pa·s en el ensayo a 25 grados, 33.98 Pa·s en el ensayo a 35 grados, 9.66 Pa·s en el ensayo realizado a 45 grados, 4.74 Pa·s en el ensayo realizado a 55 grados y 2.47 Pa·s en el ensayo a 65 grados.

El comportamiento dilatante comienza a unas velocidades de cizalla de 1.88 s^{-1} en el ensayo realizado a 25 grados, 3.44 s^{-1} en el ensayo realizado a 35 grados, 11.46 s^{-1} en el ensayo a 45 grados, 34.16 s^{-1} para el ensayo a 55 grados y 58.56 s^{-1} durante el ensayo a 65 grados.

Por otra parte, el comportamiento dilatante termina a unas velocidades de cizalla de 5.57 s^{-1} en el ensayo a 25 grados, 15.67 s^{-1} en el ensayo a 35 grados, 38.83 s^{-1}

en el ensayo a 45 grados, 111.68 s^{-1} durante el ensayo a 55 grados y 190.51 s^{-1} en el ensayo realizado a 65 grados.

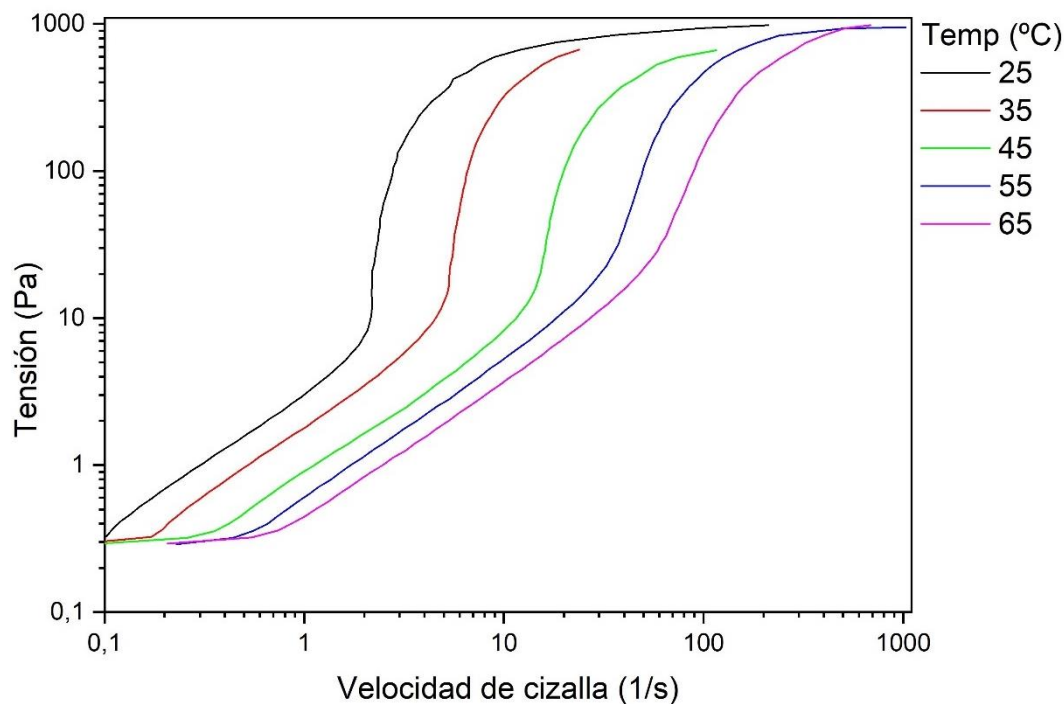


Fig. 6.4. Curva de fluidez para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 10 por ciento a diferentes temperaturas.

La imagen 6.4 muestra la curva de fluidez para los ensayos realizados sobre esta muestra. En la curva de fluidez también se puede comprobar como la tensión a la que comienza el efecto dilatante aumenta ligeramente al aumentar la temperatura y también que esta tensión se produce a velocidades de cizalla más altas a medida que se aumenta la temperatura.

La tensión a la que aparece el efecto dilatante durante estos ensayos es de 6.56 Pa en el ensayo a 25 grados, 6.49 Pa en el ensayo realizado a 35 grados, 9.92 Pa en el ensayo a 45 grados, 25.51 Pa en el ensayo a 55 grados y 28.5 Pa en el ensayo a 65 grados.

6.1.3. Resultados obtenidos para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento

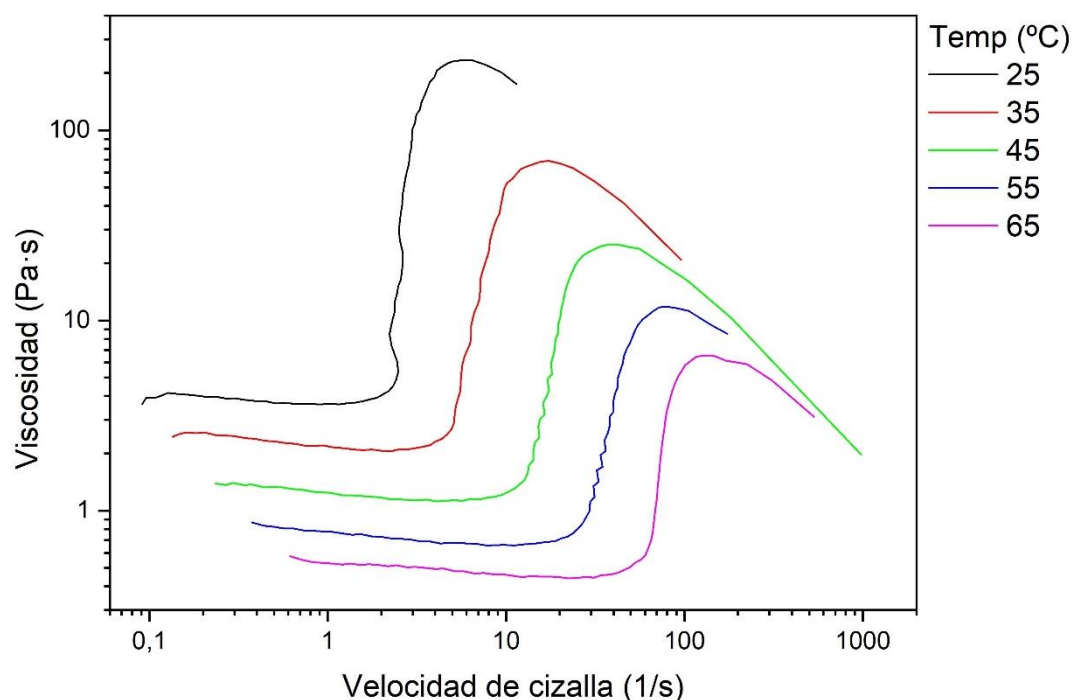


Fig. 6.5. Curva de viscosidad para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 12.5 por ciento a diferentes temperaturas.

En la imagen se puede observar la curva de viscosidad obtenida en los ensayos para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 12.5 por ciento. En esta figura se puede observar una disminución de la viscosidad a medida que se aumenta la temperatura a la que se realiza el ensayo.

Las viscosidades a las que comienza el comportamiento dilatante en los ensayos realizados a esta muestra son de 3.76 Pa·s en el ensayo a 25 grados, 2.51 Pa·s en el ensayo a 35 grados, 1.21 Pa·s en el ensayo a 45 grados, 0.69 Pa·s en el ensayo a 55 grados y 0.53 Pa·s en el ensayo a 65 grados.

Las viscosidades máximas que se alcanzan en estos ensayos son de 232.66 Pa·s en el ensayo a 25 grados, 69.12 Pa·s en el ensayo realizado en el ensayo a 35 grados, 25.15 Pa·s en el ensayo realizado en el ensayo a 45 grados, 11.83 Pa·s en el ensayo realizado a 55 grados y 6.54 Pa·s en el ensayo realizado a 65 grados.

Las velocidades de cizalla a la que comienza el comportamiento dilatante son 1.57 s⁻¹ en el ensayo a 25 grados, 4.66 s⁻¹ en el ensayo a 35 grados, 9.53 s⁻¹ en el ensayo a 45 grados, 18.74 s⁻¹ en el ensayo realizado a 55 grados y 52.88 s⁻¹ en el ensayo a 65 grados.

Las velocidades de cizalla a las que termina el comportamiento dilatante son 5.76 s⁻¹ en el ensayo a 25 grados, 17.27 s⁻¹ en el ensayo a 35 grados, 37.66 s⁻¹ en el

ensayo a 45 grados, 79.99 s^{-1} en el ensayo a 55 grados y 144.21 s^{-1} en el ensayo a 65 grados.

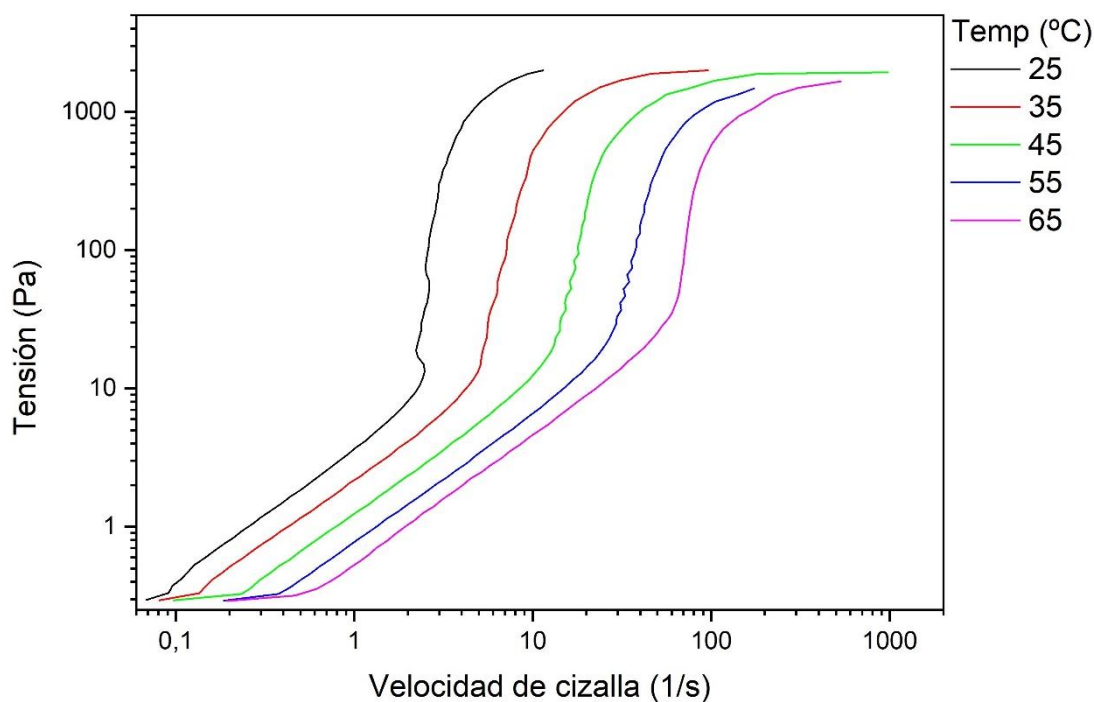


Fig. 6.6. Curva de fluidez para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 12.5 por ciento a diferentes temperaturas.

En la figura 6.6 se muestra la curva de fluidez obtenida para los ensayos realizados a la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 12.5 por ciento. En esta figura se puede observar un leve incremento de la tensión a la que comienza el efecto dilatante a medida a la que se aumenta la temperatura a la que se realiza el ensayo y un aumento de la velocidad de cizalla a la que se alcanza dicha tensión a medida que se aumenta la temperatura.

Las tensiones a las que comienza el efecto dilatante durante estos ensayos es de 5.91 Pa en el ensayo a 25 grados, 11.72 Pa en el ensayo a 35 grados, 11.57 Pa en el ensayo a 45 grados, 12.91 Pa en el ensayo a 55 grados y 28.06 Pa en el ensayo a 65 grados.

6.1.4. Resultados obtenidos para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento

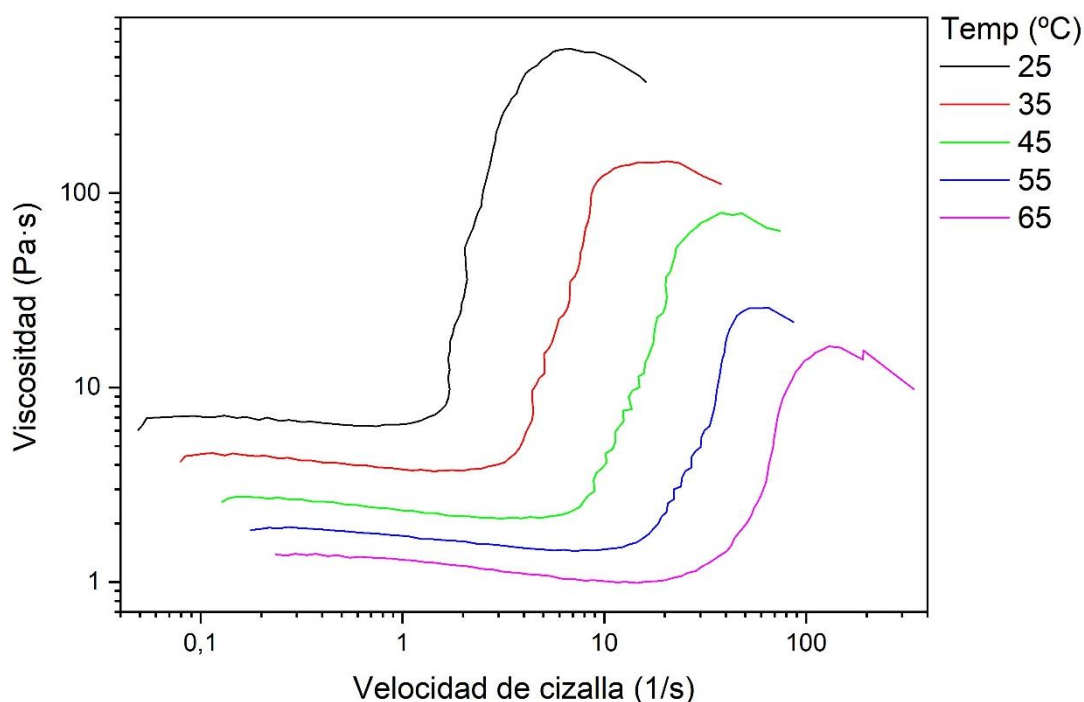


Fig. 6.7. Curva de viscosidad para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 15 por ciento a diferentes temperaturas.

En la figura 6.7 se puede observar la curva de viscosidad obtenida para los ensayos realizados a la muestra con una fracción másica del 15 por ciento. En esta figura se puede observar como un aumento de la temperatura provoca que el comportamiento dilatante se produzca a velocidades de cizalla mayores y que la viscosidad de la muestra sea menor.

Las viscosidades a las que comienza el comportamiento dilatante son de 6.76 Pa·s en el ensayo a 25 grados, 3.93 Pa·s en el ensayo a 35 grados, 2.34 Pa·s en el ensayo a 45 grados, 1.51 Pa·s en el ensayo a 55 grados y 1.11 Pa·s en el ensayo a 65 grados.

Las viscosidades máximas alcanzadas durante estos ensayos son de 552.6 Pa·s en el ensayo a 25 grados, 145.85 Pa·s en el ensayo a 35 grados, 79.14 Pa·s en el ensayo a 45 grados, 25.76 Pa·s en el ensayo a 55 grados y 16.32 Pa·s en el ensayo a 65 grados.

Las velocidades de cizalla a las que comienza el comportamiento dilatante en estos ensayos son de 1.24 s⁻¹ en el ensayo a 25 grados, 2.67 s⁻¹ en el ensayo a 35 grados, 7.06 s⁻¹ en el ensayo a 45 grados, 12.23 s⁻¹ en el ensayo a 55 grados y 25.96 s⁻¹ en el ensayo a 65 grados.

Las velocidades de cizalla a las que termina el comportamiento dilatante en estos ensayos son de 6.83 s^{-1} en el ensayo a 25 grados, 20.56 s^{-1} en el ensayo a 35 grados, 37.88 s^{-1} en el ensayo a 45 grados, 65.37 s^{-1} en el ensayo a 55 grados y 129.83 s^{-1} en el ensayo a 65 grados.

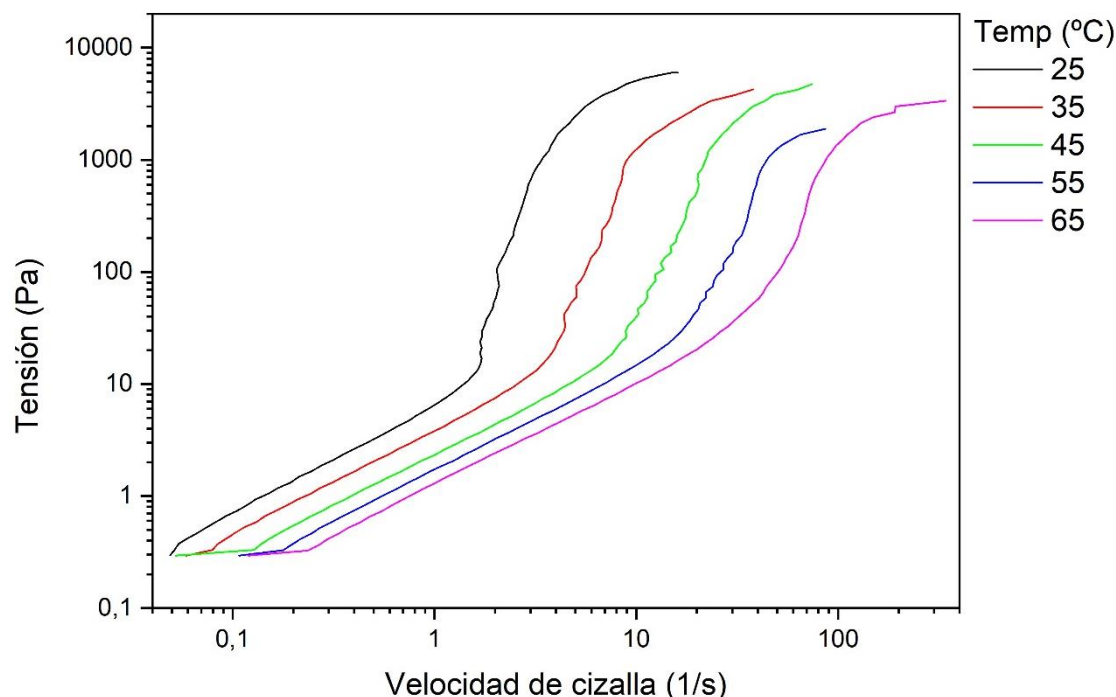


Fig. 6.8. Curva de fluidez para la mezcla de propilenglicol con una fracción másica del 15 por ciento a diferentes temperaturas.

En la figura 6.8 se puede observar la curva de fluidez para los ensayos realizados a la muestra con una fracción másica del 15 por ciento. En esta figura se puede ver como un aumento de las temperaturas hace que la tensión a la que comienza el efecto dilatante sea ligeramente más alta y se produzca a velocidades de cizalla mayores.

Las tensiones a las que comienza el efecto dilatante en estos ensayos son 8.37 Pa en el ensayo a 25 grados, 10.48 Pa en el ensayo a 35 grados, 16.5 Pa en el ensayo a 45 grados, 18.4 Pa en el ensayo a 55 grados y 28.95 Pa en el ensayo a 65 grados.

6.1.5. Comparación de los resultados para las diferentes muestras

A continuación, se va a comparar los resultados obtenidos para las distintas fracciones másicas manteniendo una temperatura constante, 35 grados en este caso, con el fin de estudiar el efecto de la fracción másica en los fluidos dilatantes.

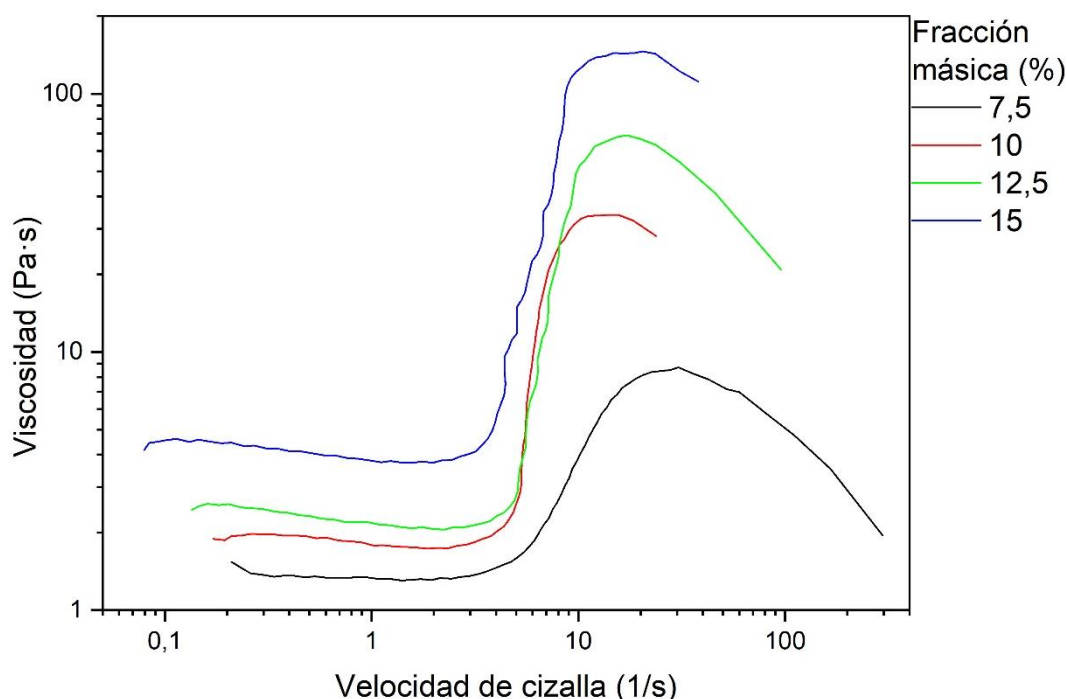


Fig. 6.9. Comparación de la curva de viscosidad a una temperatura de 35°C para las distintas muestras con una fracción másica de 7.5%, 10%, 12.5% y 15%.

En la figura 6.9 se pueden observar la curva de fluidez para las distintas fracciones másicas empleadas a la misma temperatura, 35 grados. En la curva de viscosidad se puede observar como aumentar la fracción másica de la disolución propicia un aumento de la viscosidad, pudiendo llegar a ser varios ordenes de magnitud mayor en algunos casos y, también, que el comportamiento dilatante comience a velocidades de cizalla menores a medida que se aumenta la fracción másica.

La viscosidad a la que comienza el comportamiento dilatante para las diferentes fracciones másicas es de 1.41 Pa·s en la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento, 1.89 Pa·s en el ensayo con una fracción másica del 10 por ciento, 2.51 Pa·s en el ensayo realizado a la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento y 3.93 Pa·s en el ensayo realizado a la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.

La viscosidad máxima que se alcanza en los ensayos para la diferentes fracciones másicas son 8.7 Pa·s en el ensayo con la fracción másica del 7.5 por ciento, 33.89 Pa·s en el ensayo realizado a la muestra con una fracción másica del 10 por ciento, 69.12 Pa·s en el ensayo realizado a la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento y 145.85 Pa·s en el ensayo realizado a la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.

Las velocidades de cizalla a las que comienza el comportamiento dilatante para las distintas muestras son de 3.62 s^{-1} en el ensayo realizado a la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento, 3.44 s^{-1} en el ensayo realizado a la muestra con

una fracción másica del 10 por ciento, 4.66 s^{-1} en el ensayo realizado a la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento y 2.67 s^{-1} en el ensayo a la fracción másica del 15 por ciento.

Las velocidades de cizalla a las que se termina el comportamiento dilatante son de 6.83 s^{-1} en el ensayo realizado con una fracción másica del 7.5 por ciento, 15.67 s^{-1} en el ensayo a la muestra con una fracción másica del 10 por ciento, 17.27 s^{-1} en el ensayo a la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento y 20.56 s^{-1} en el ensayo a la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.

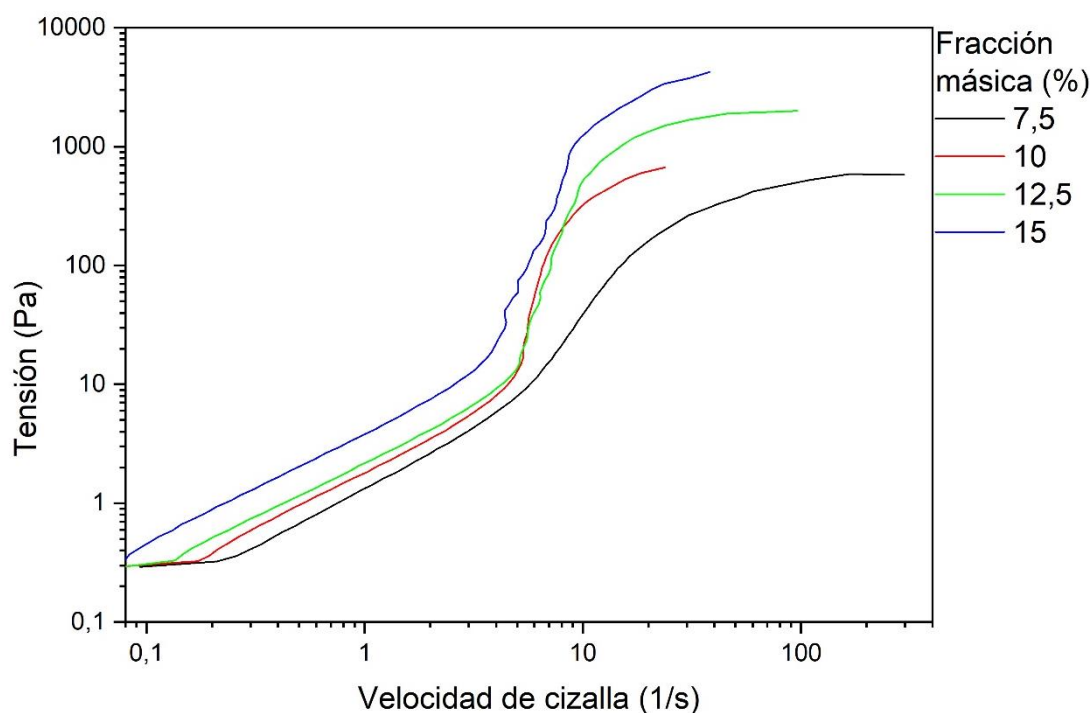


Fig. 6.10. Comparación de la curva de fluidez a una temperatura de 35°C para las distintas muestras con una fracción másica de 7.5%, 10%, 12.5% y 15%.

Respecto a la curva de fluidez, figura 6.10, el aumento en la fracción másica también propicia que se produzca la aparición del efecto dilatante a menores velocidades de cizalladura y un pequeño aumento en la tensión de cizalladura a partir de la que se comienza a producir el efecto dilatante.

La tensión a la que termina el efecto dilatante para las diferentes fracciones másicas es de 5.11 Pa en el ensayo realizado a la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento, 6.49 Pa para el ensayo realizado a la muestra con una fracción másica del 10 por ciento, 11.72 Pa en el ensayo con la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento y 10.48 Pa en el ensayo realizado sobre la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.

6.2. Resultados de los ensayos oscilatorios

También se realizó un ensayo de deformación dinámica en el que se iba aumentando la deformación que sufría el material. La frecuencia a la que se realizaron estos ensayos es de 15 Hz y se realizaron varias mediciones a distintas temperaturas.

Con este tipo de ensayo se podrá comparar la viscosidad compleja, los módulos elásticos, viscosos y complejos y el ángulo de fase para las distintas fracciones másicas y las distintas temperaturas.

6.2.1. Resultados obtenidos para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento

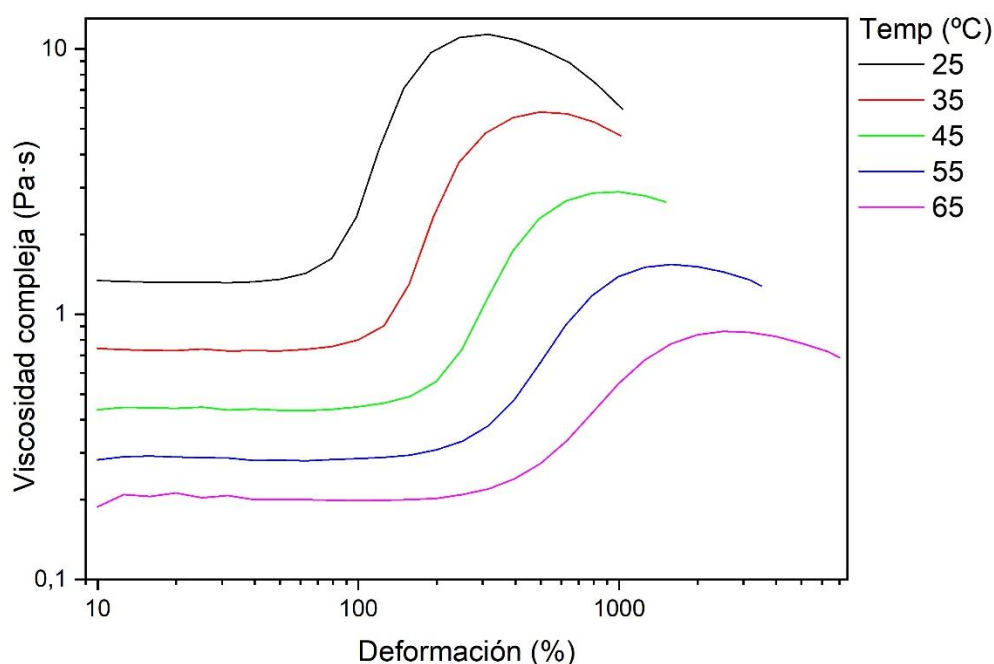


Fig. 6.11. Viscosidad compleja en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento a diferentes temperaturas.

En la imagen 6.11. se puede observar la evolución de la viscosidad compleja para las distintas temperaturas. En ella se observa como al aumentar la temperatura disminuye la viscosidad compleja, lo mismo que ocurría con la viscosidad en los ensayos rotacionales mostrados anteriormente.

El comportamiento dilatante comienza para unos valores de viscosidad compleja de 1.62 Pa·s en el ensayo realizado a 25 grados, 1.3 Pa·s en el ensayo a 35 grados, 0.73 Pa·s en el ensayo a 45 grados, 0.48 Pa·s en el ensayo a 55 grados y 0.27 Pa·s en el ensayo a 65 grados.

La viscosidad compleja alcanza un valor máximo de 11.33 Pa·s a una temperatura de 25 grados, un valor máximo de 5.78 Pa·s a 35 grados, 2.89 Pa·s a 45 grados,

1.54 Pa·s a 55 grados y un valor máximo de 0.86 Pa·s para el ensayo realizado a 65 grados.

El comportamiento dilatante comienza para unas deformaciones del 79.02 por ciento para el ensayo a 25 grados, 156.71 por ciento para el ensayo a 35 grados, 249.66 por ciento en el ensayo a 45 grados, 396.48 por ciento durante el ensayo a 55 grados y 500.15 por ciento en el ensayo a 65 grados.

Por otra parte, este comportamiento termina a una deformación del 314.8 por ciento en la muestra a 25 grados, 498.13 por ciento para el ensayo a 35 grados, 999.24 por ciento en el ensayo a 45 grados, 1582.53 por ciento en el ensayo a 55 grados y 2508.01 por ciento en el ensayo a 65 grados.

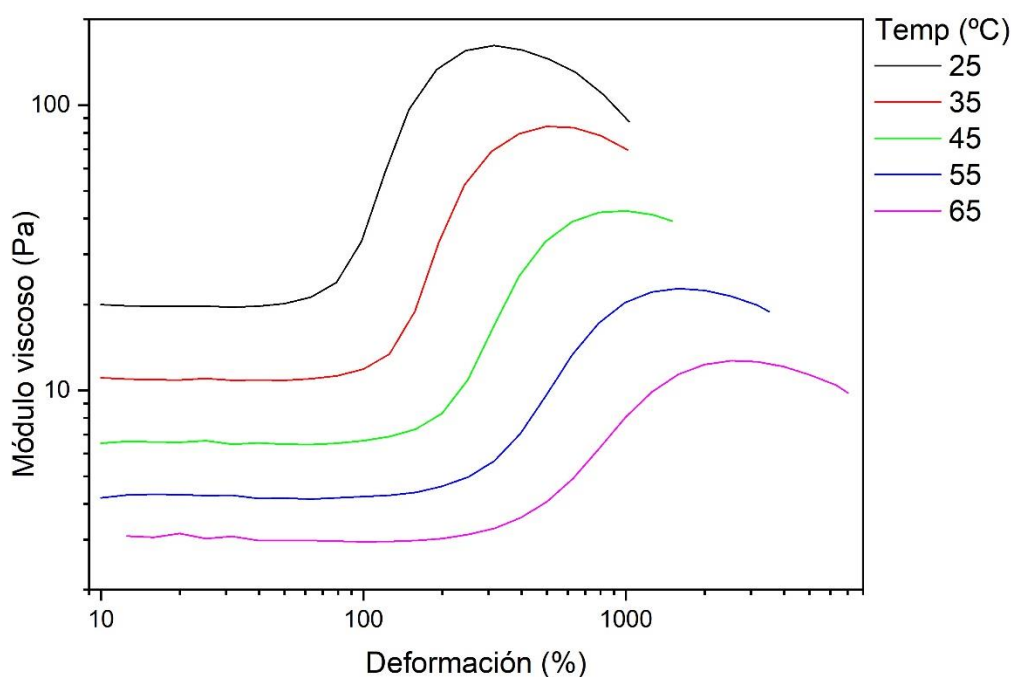


Fig. 6.12. Módulo viscoso en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento a distintas temperaturas.

En la figura 6.12. se puede ver el módulo viscoso en los ensayos realizados a la muestra con una fracción másica de 7.5. Como se puede observar, al igual que con la viscosidad compleja, el módulo viscoso disminuye con el efecto de la temperatura para una misma muestra.

Los valores máximos que alcanza el módulo viscoso para los diferentes ensayos son de 161.84 Pa para el ensayo realizado a 25 grados, 84.16 Pa para el ensayo realizado a 35 grados, 42.65 Pa en el caso del ensayo realizado a 45 grados, 22.75 Pa en el ensayo a 55 grados y 12.71 Pa en el ensayo a 65 grados.

Como se puede observar, la temperatura propicia en gran medida que el efecto dilatante aparezca a deformaciones mayores y también que termine a deformaciones más altas.

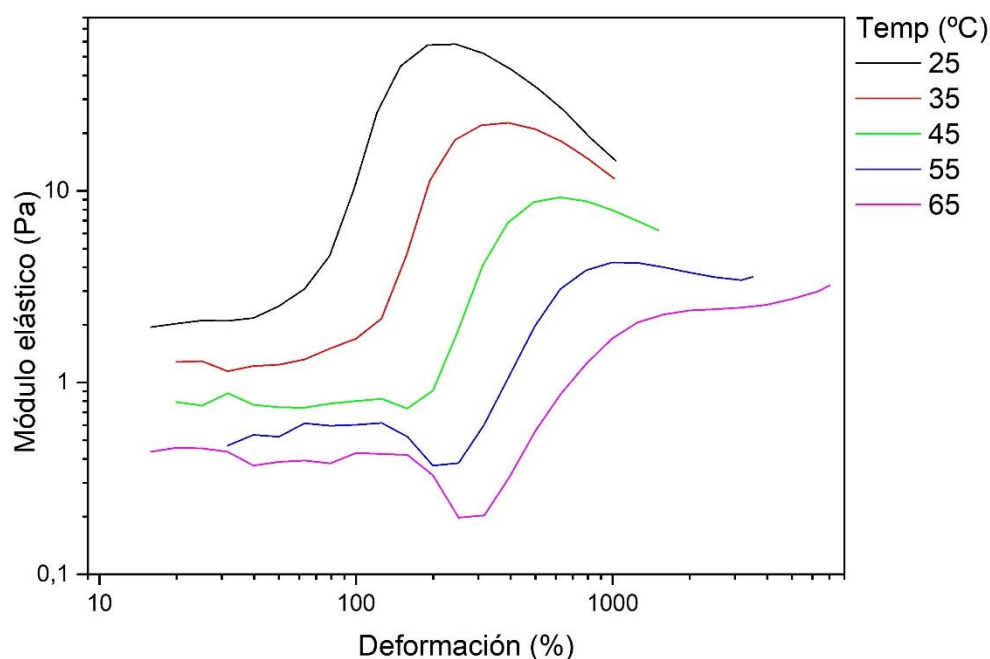


Fig. 6.13. Módulo elástico en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento a distintas temperaturas.

En la figura 6.13. se puede comprobar el comportamiento del módulo elástico a las distintas temperaturas. Se puede ver como el módulo elástico disminuye al aumentar la temperatura al igual que sucedía con el módulo viscoso y la viscosidad compleja.

El módulo elástico alcanza un valor máximo de 58.19Pa a una temperatura de 25 grados, un valor máximo de 22.65 Pa en el ensayo a 35 grados, 9.26 Pa a 45 grados, 4.23 Pa en el caso del ensayo a 55 grados y un valor máximo de 3.22 Pa para el ensayo realizado a 65 grados.

Comparando la figura 6.5. y 6.6. se puede observar que el módulo viscoso es mayor que el módulo elástico, lo que indica que el comportamiento de esta muestra se asemeja más al de un líquido viscoso que al de un sólido elástico y que, por tanto, esta muestra tiene una capacidad mayor para disipar energía que para almacenarla.

Con los datos del módulo de viscoso y el módulo elástico se puede obtener el valor del ángulo de fase para los diferentes ensayos realizados en la muestra con una fracción másica de 7.5. El ángulo de fase alcanza un valor de 65.18° en el ensayo a 25 grados Celsius, en el ensayo a 35 grados Celsius se obtiene un ángulo de fase de 70.72°, en el caso del ensayo de 45 grados Celsius el valor obtenido para el ángulo de fase es de 74.77°, 77.05° para el caso de 55 grados Celsius y 78.09° en el ensayo a 65 grados Celsius. Como se puede observar, el resultado obtenido para el ángulo de fase aumenta a medida que aumenta la temperatura haciendo que las muestras tengan un comportamiento más parecido al de un líquido viscoso a

medida que se aumenta la temperatura. En este caso el ángulo de fase se encuentra en valores cercanos a los 60 y 80 grados, lo que supone que el comportamiento de la muestra se acerca al de un fluido viscoso y, por tanto, la capacidad para disipar energía es elevada.

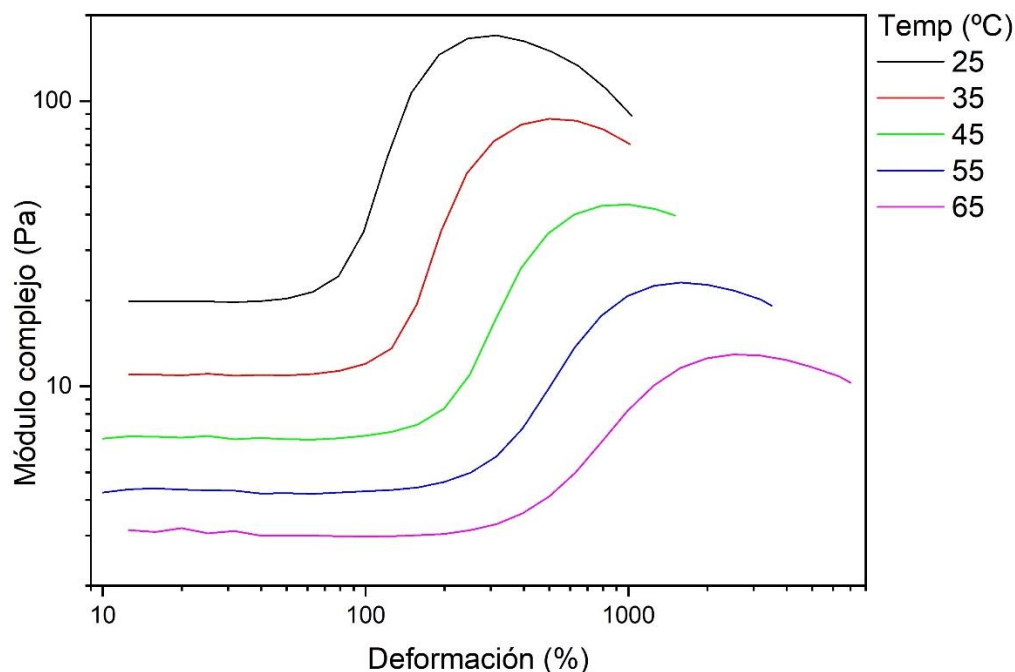


Fig. 6.14. Módulo complejo en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento a distintas temperaturas.

En la figura 6.14. se puede observar el módulo complejo obtenido en los diferentes ensayos. Se puede observar como el módulo complejo varía con la temperatura de forma similar a como lo hacían los módulos elásticos y viscosos, disminuyendo al aumentar la temperatura de ensayo.

Los valores máximos del módulo complejo son 169.98 Pa en el ensayo de 25 grados, 86.74 Pa para el ensayo a 35 grados, 43.38 Pa a 45 grados, 23.1 Pa en el ensayo a 55 grados y en el ensayo a 65 grados 12.94 Pa.

Con estos resultados se puede concluir que la temperatura afecta en gran medida a los valores de la viscosidad compleja y a los módulos complejo, viscoso y elástico y la temperatura afecta en menor medida a los valores del ángulo de fase.

6.2.2. Resultados obtenidos para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento

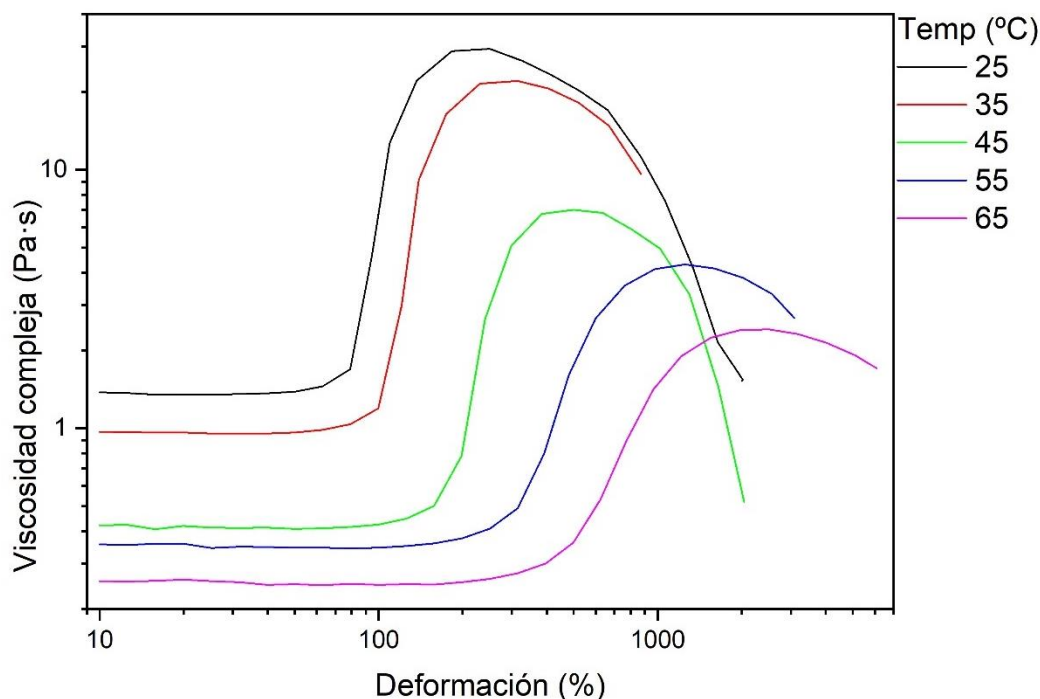


Fig. 6.15. Viscosidad compleja en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento a diferentes temperaturas.

En la figura 6.15 se puede observar la variación de la viscosidad para los ensayos realizados a la muestra con una fracción másica del 10 por ciento. En esta figura se puede observar como aumentado la temperatura se disminuye la viscosidad compleja.

El comportamiento dilatante comienza para unos valores de viscosidad compleja de 1.45 Pa·s en el ensayo a 25 grados, 1.04 Pa·s en el ensayo a 35 grados, 0.78 Pa·s en el ensayo a 45 grados, 0.8 Pa·s en el ensayo a 55 grados y 0.53 Pa·s durante el ensayo a 65 grados.

El valor máximo de viscosidad compleja que se alcanza durante estos ensayos es de 29.37 Pa·s para el ensayo a 25 grados, 22.07 Pa·s para el ensayo a 35 grados, 6.99 Pa·s para el ensayo a 45 grados, 4.31 Pa·s para el ensayo a 55 grados y 2.41 Pa·s para el ensayo a 65 grados.

El comportamiento dilatante comienza para una deformación del 62.97 por ciento para el ensayo a 25 grados, 79.29 por ciento para el ensayo a 35 grados, 198 por ciento para el ensayo a 45 grados, 391.47 por ciento para el ensayo a 55 grados y 622.13 por ciento para el ensayo a 65 grados.

Este comportamiento termina para unas deformaciones de 250.1 por ciento para el ensayo a 25 grados, 314.6 por ciento para el ensayo a 35 grados, 499 por ciento a

45 grados, 1250.58 por ciento para el ensayo a 55 grados y 2511.59 por ciento para el ensayo a 65 grados.

En esta muestra se puede encontrar una fuerte dependencia de la aparición del comportamiento dilatante con la temperatura, llegando a haber un acusado aumento de la deformación necesaria para que se produzca el comportamiento dilatante con el aumento de la temperatura hasta el punto en el que el comportamiento dilatante de algunas muestras comienza cuando en otras este ya ha terminado.

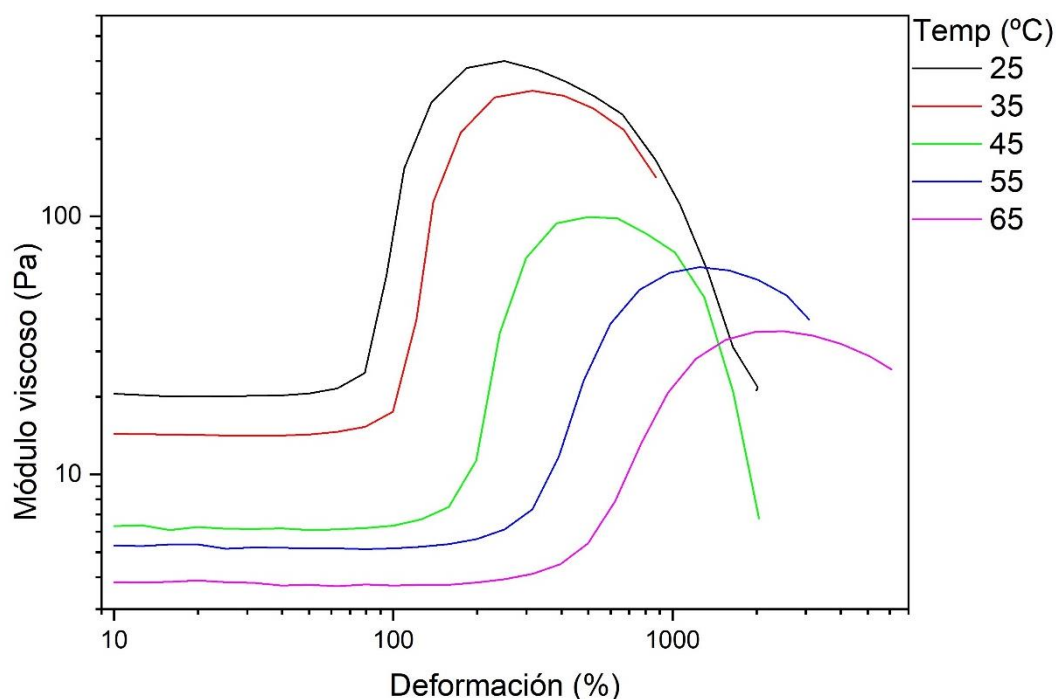


Fig. 6.16. Módulo viscoso en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento a distintas temperaturas.

En la figura 6.16 se puede observar la variación del módulo viscoso con la temperatura. En él se puede observar una disminución del módulo viscoso con la temperatura.

El valor máximo del módulo viscoso es de 400.26 Pa para la muestra durante el ensayo realizado a 25 grados, 307.42 Pa durante el ensayo realizado a 35 grados, 99.57 Pa para el ensayo a 45 grados, 61.68 Pa para en el ensayo a 55 grados y 35.94 Pa en el ensayo a 65 grados.

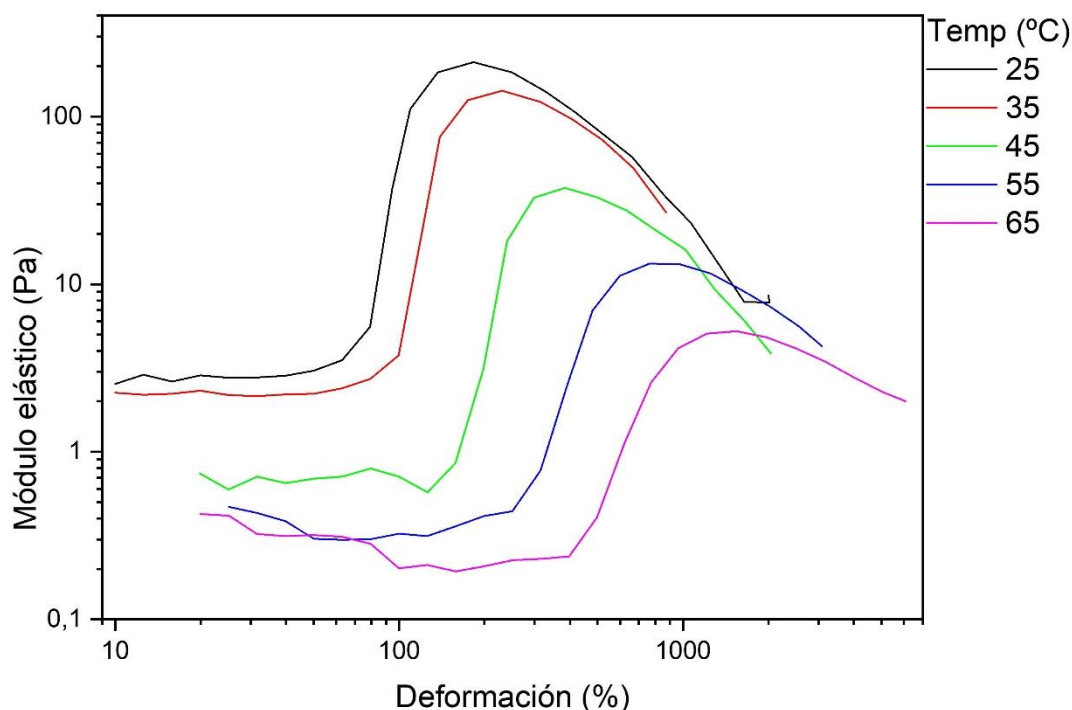


Fig. 6.17. Módulo elástico en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento a distintas temperaturas.

En la figura 6.17 se puede observar la variación del módulo elástico con la temperatura para los ensayos realizados en las muestras con una fracción másica del 10 por ciento. En ella se puede observar como al aumentar la temperatura se consigue disminuir el módulo elástico y también se consigue que su aparición sea a deformaciones superiores.

Los valores máximos del módulo elástico son 210.97 Pa para el ensayo a 25 grados, 143.03 Pa durante el ensayo realizado a 35 grados, 37.58 Pa para el ensayo a 45 grados, 13.26 Pa para el ensayo a 55 grados y 5.24 Pa en el ensayo a 65 grados.

Como se puede observar el módulo viscoso es mayor al módulo elástico, por tanto, el ángulo de fase para los ensayos realizados en esta muestra será superior a 45 grados y por tanto el comportamiento de la muestra será más parecido al de un líquido viscoso que al de un sólido elástico.

El ángulo de fase de la muestra para los distintos ensayos es de 54.23° para el ensayo realizado a 25 grados, 56.47° para el ensayo a 35 grados centígrados, 60.16° para el ensayo realizado a 45 grados, 73.18° para el ensayo a 55 grados y 78.67° durante el ensayo realizado a 65 grados. Como se puede comprobar, el ángulo de fase aumenta al aumentar la temperatura igual que sucedía en la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.

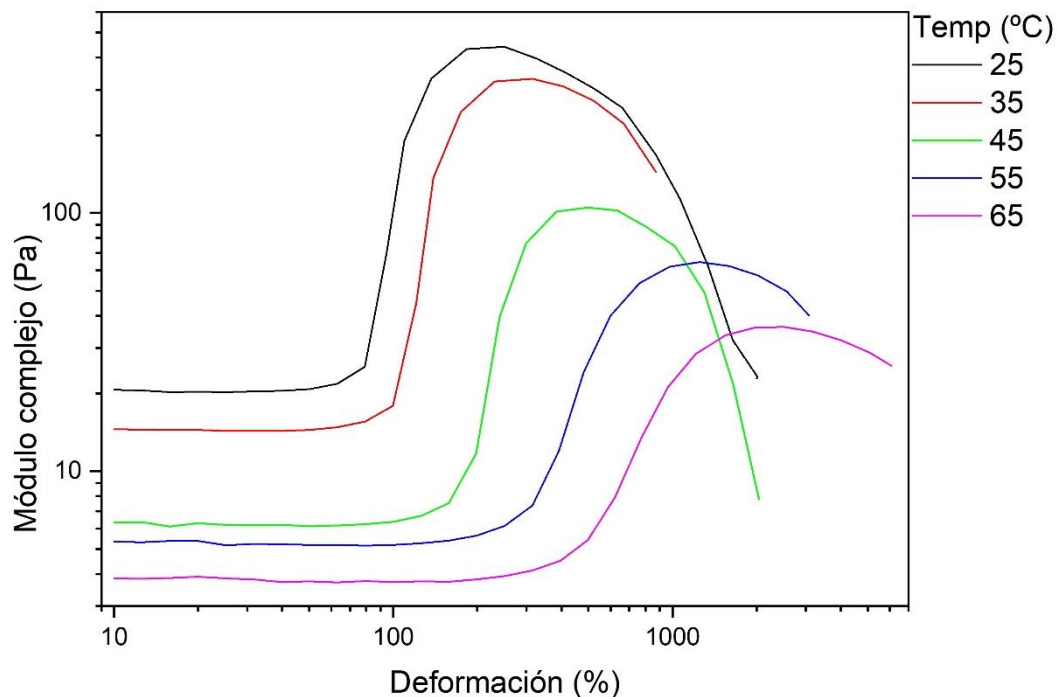


Fig. 6.18. Módulo complejo en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento a distintas temperaturas.

En la figura 6.18 se puede observar la evolución del módulo complejo para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento para los ensayos realizados a diferentes temperaturas, en ella podemos ver como el módulo complejo disminuye a medida que se aumenta la temperatura y como su aparición se da a deformaciones más altas a medida que se aumenta la temperatura.

Los valores máximos del módulo complejo son 440.41 Pa en el ensayo de 25 grados, 330.86 Pa para el ensayo a 35 grados, 104.9 Pa a 45 grados, 64.6 Pa en el ensayo a 55 grados y en el ensayo a 65 grados 36.18 Pa.

6.2.3. Resultados obtenidos para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento

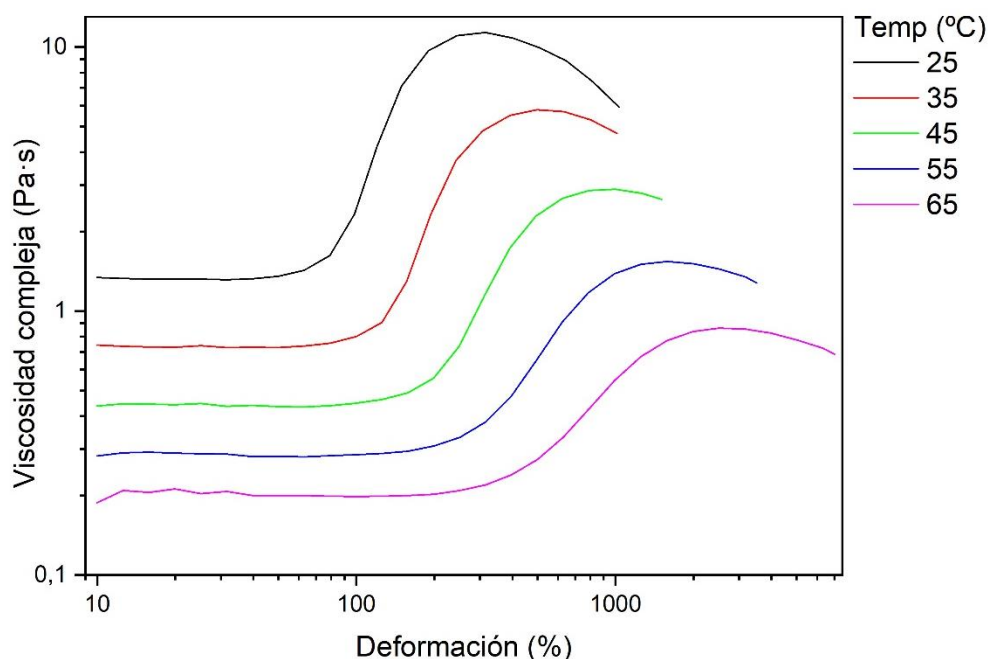


Fig. 6.19. Viscosidad compleja en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento a diferentes temperaturas.

En la figura 6.19 se puede observar la evolución de la viscosidad compleja durante los ensayos rotacionales a diferentes temperaturas a los que se ha sometido a las muestras con una fracción másica del 12.5 por ciento. En ella se puede apreciar un descenso de la viscosidad compleja a medida que se aumenta la temperatura.

Los valores de la viscosidad compleja a los que comienza el comportamiento dilatante durante estos ensayos son de 1.93 Pa·s en el ensayo a 25 grados, 1.74 Pa·s en el ensayo a 35 grados, 0.79 Pa·s en el ensayo a 45 grados, 0.54 Pa·s en el ensayo a 55 grados y 0.4 Pa·s en el ensayo a 65 grados.

Los valores máximos de la viscosidad compleja son 79.65 Pa·s para el ensayo a 25 grados, 49.51 Pa·s en el ensayo a 35 grados, 27 Pa·s durante el ensayo a 45 grados, 11.11 Pa·s en el ensayo a 55 grados y 6.74 Pa·s en el ensayo a 65 grados.

El comportamiento dilatante en estos ensayos empieza en unas deformaciones del 62.79 por ciento en el ensayo a 25 grados, 130.5 en el ensayo a 35 grados, 156.96 por ciento en el ensayo a 45 grados, 312.93 por ciento en el ensayo a 55 grados y 397.08 por ciento en el ensayo a 65 grados.

Por otra parte, este comportamiento termina para unas deformaciones del 250.7 por ciento durante el ensayo a 25 grados, 306.98 por ciento para el ensayo a 35 grados, 354.13 por ciento en el ensayo a 45 grados, 996.69 por ciento en el ensayo a 55 grados y 1207.27 por ciento a 65 grados.

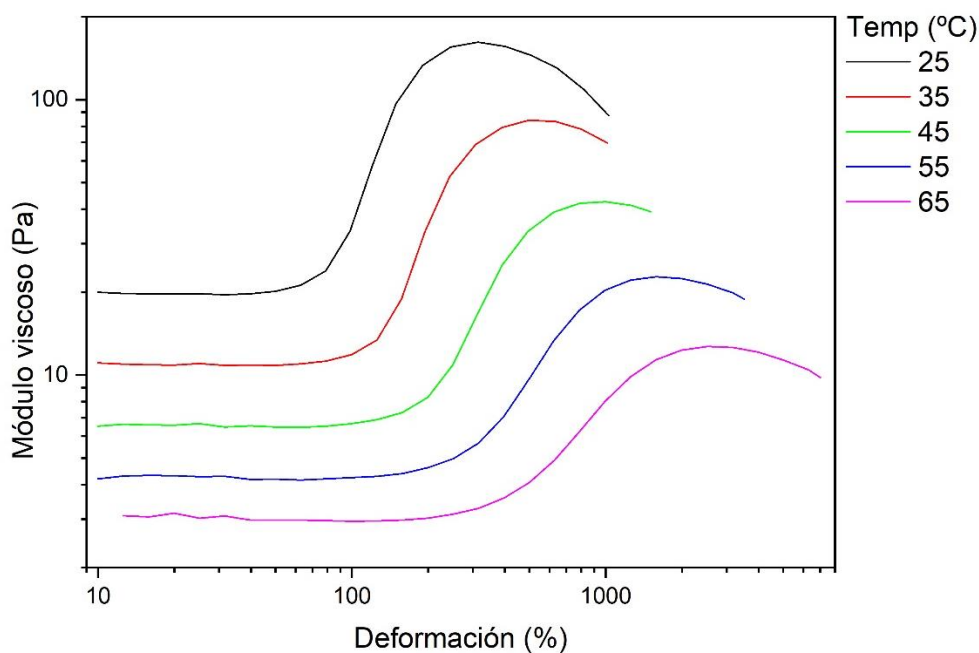


Fig. 6.20. Módulo viscoso en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento a distintas temperaturas.

En la figura 6.20 se puede ver los resultados obtenidos para el módulo viscoso en los ensayos rotacionales a los que se ha sometido a la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento. En esta dicha imagen se puede observar como un aumento de la temperatura propicia una disminución en el módulo viscoso.

Los valores máximos del módulo viscoso durante estos ensayos son 1066.42 Pa en el ensayo a 25 grados, 678.8 Pa en el ensayo a 35 grados, 386.52 durante el ensayo a 45 grados, 166.38 Pa en el ensayo a 55 grados y 99.64 Pa en el ensayo a 65 grados.

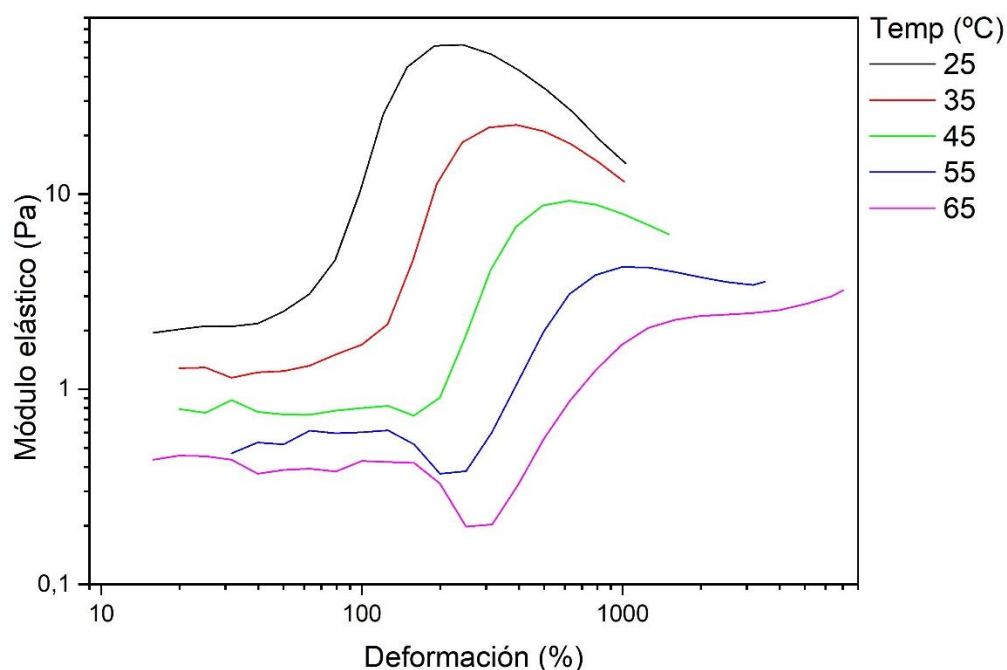


Fig. 6.21. Módulo elástico en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento a distintas temperaturas.

En la figura 6.21 se puede observar la evolución del módulo elástico en función de la temperatura para los ensayos realizados a la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento. En esta figura se puede observar una disminución del módulo elástico respecto al aumento de las temperaturas similar al que ocurría con el módulo viscoso.

El valor máximo del módulo viscoso es de 635.78 Pa en el ensayo realizado a 25 grados centígrados, 351.39 Pa en el ensayo a 35 grados, 156.86 Pa en el ensayo realizado a 45 grados, 43.54 Pa en el ensayo realizado a 55 grados y 19.98 Pa para el ensayo realizado a 65 grados.

Como se puede observar, los valores del módulo viscoso son superiores a los del módulo elástico y, por tanto, el comportamiento de esta muestra se puede considerar más cercano al de un líquido viscoso que al de un sólido elástico.

Los valores del ángulo de fase para esta muestra son 49.62° para el ensayo realizado a 25 grados centígrados, 53.13° en el ensayo realizado a 35 grados Celsius, 58.27° en el ensayo a 45 grados Celsius, 67.06° en el ensayo a 55 grados Celsius y 71.5° para el ensayo realizado a 65 grados Celsius. A la vista de los resultados se puede apreciar que un aumento de la temperatura implica un aumento del ángulo de fase y lo asemeja más al comportamiento de un líquido viscoso.

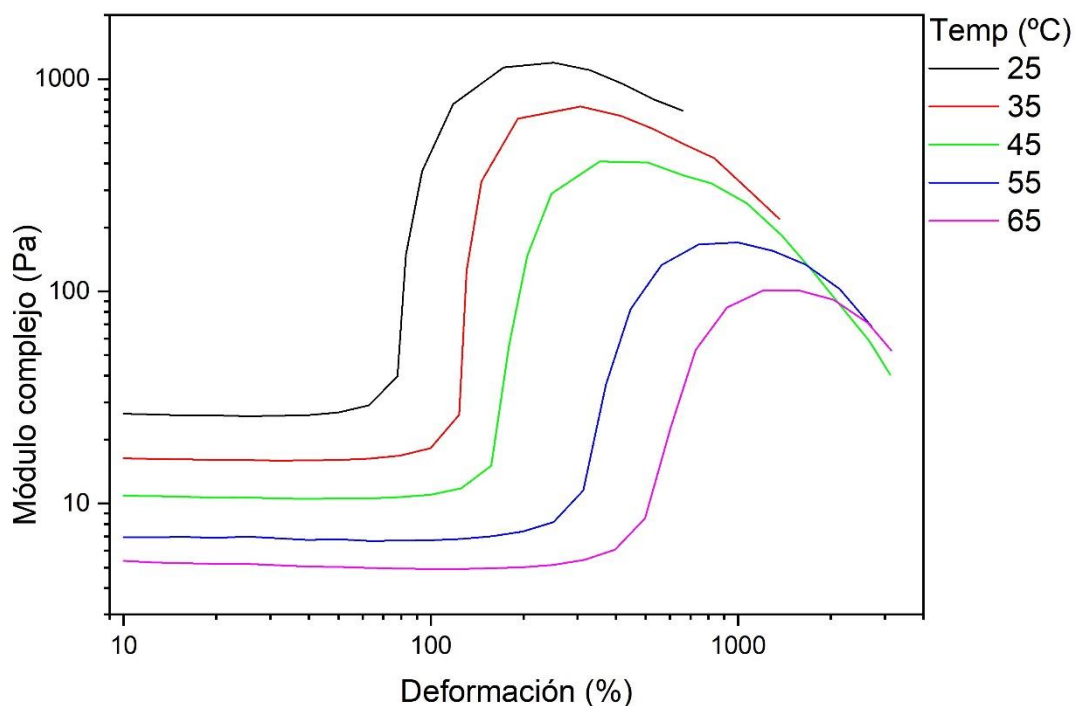


Fig. 6.22. Módulo complejo en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento a distintas temperaturas.

Los resultados del módulo complejo para los ensayos realizados a la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento se pueden observar en la figura 6.22. En ella se puede apreciar un descenso del módulo complejo a medida que se aumenta la temperatura.

Los valores máximos del módulo complejo son 1194.82 Pa para el ensayo realizado a 25 grados, 742.65 Pa en el ensayo a 35 grados, 409.51 Pa en el ensayo a 45 grados, 166.67 Pa en el ensayo a 55 grados y 101.11 Pa en el ensayo a 65 grados.

6.2.4. Resultados obtenidos para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento

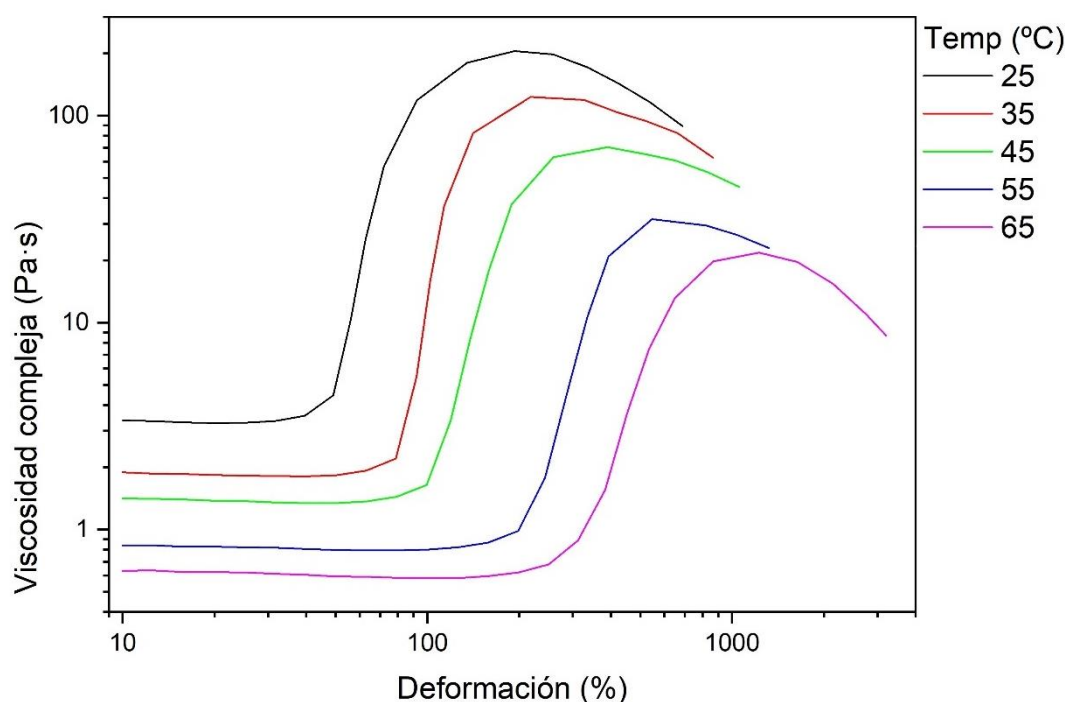


Fig. 6.23. Viscosidad compleja en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento a diferentes temperaturas.

Em la figura 6.23 se puede apreciar la variación de la viscosidad compleja a medida que se aumenta la deformación para ensayos realizados a distinta temperatura. En dicha imagen se puede apreciar un aumento de la viscosidad compleja a medida que aumenta la deformación aplicada a la muestra y, también, una disminución de la viscosidad compleja a medida que se aumenta la temperatura.

El comportamiento dilatante comienza para unos valores de viscosidad compleja de 4.46 Pa·s en el ensayo a 25 grados, 2.2 Pa·s en el ensayo a 35 grados, 1.64 Pa·s en el ensayo a 45 grados, 0.99 Pa·s en el ensayo a 55 grados y 0.68 Pa·s en el ensayo a 65 grados.

Los valores máximos de la viscosidad compleja para los ensayos realizados en las muestras de 205.65 Pa·s para el ensayo a 25 grados, 123.52 Pa·s durante el ensayo a 35 grados, 70.57 Pa·s en el ensayo a 45 grados, 31.72 Pa·s en el ensayo a 55 grados y 21.85 Pa·s en el ensayo a 65 grados.

El comportamiento dilatante comienza para unas deformaciones del 49.13 por ciento para el ensayo a 25 grados, 78.82 por ciento para el ensayo a 35 grados, 99.28 por ciento para el ensayo a 45 grados, 198.57 por ciento en el ensayo a 55 grados y 250.28 por ciento en el ensayo a 65 grados.

Este comportamiento dilatante termina para unas deformaciones del 193.45 por ciento para el ensayo a 25 grados, 218.03 por ciento para el ensayo a 35 grados, 390.1 por ciento para el ensayo a 45 grados, 545.99 por ciento en el ensayo a 55 grados y 1226.07 por ciento para el ensayo a 65 grados.

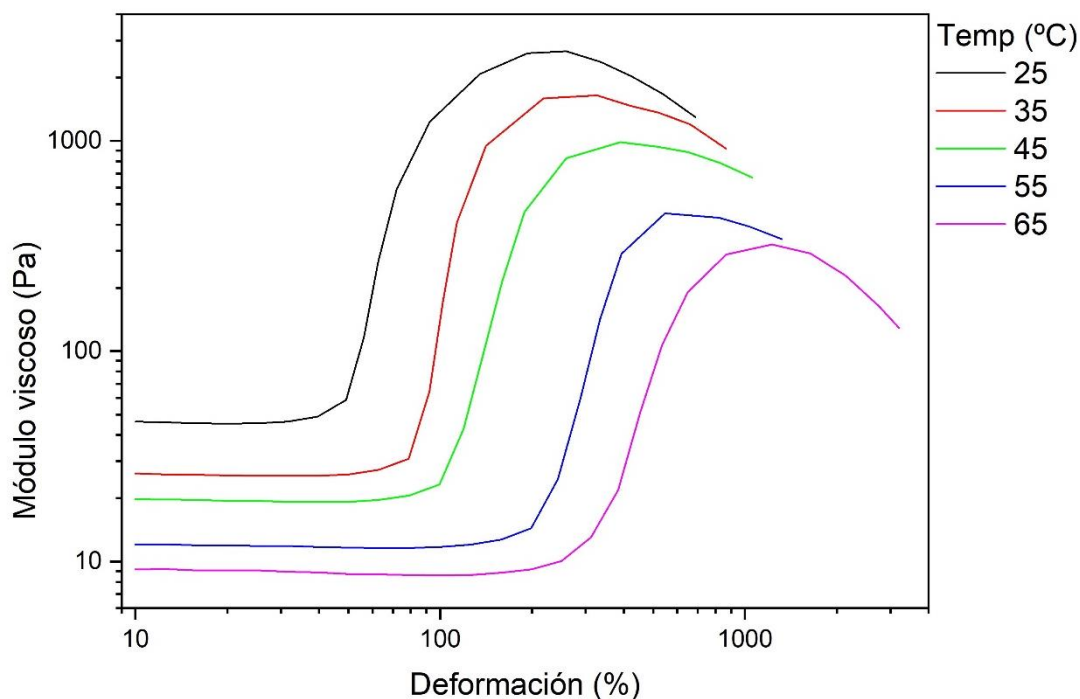


Fig. 6.24. Módulo viscoso en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento a distintas temperaturas.

En la figura 6.24 se puede ver la evolución del módulo viscoso en función de la deformación para ensayos realizados a distintas temperaturas. En esta figura se puede apreciar como a medida que se aumenta la temperatura el módulo viscoso disminuye para muestras con una misma fracción másica.

Los valores máximos del módulo viscoso son 2663.09 Pa en el ensayo a 25 grados, 1645.73 Pa en el ensayo a 35 grados, 986.64 Pa en el ensayo a 45 grados, 452.55 Pa en el ensayo a 55 grados y 322.17 Pa en el ensayo a 65 grados.

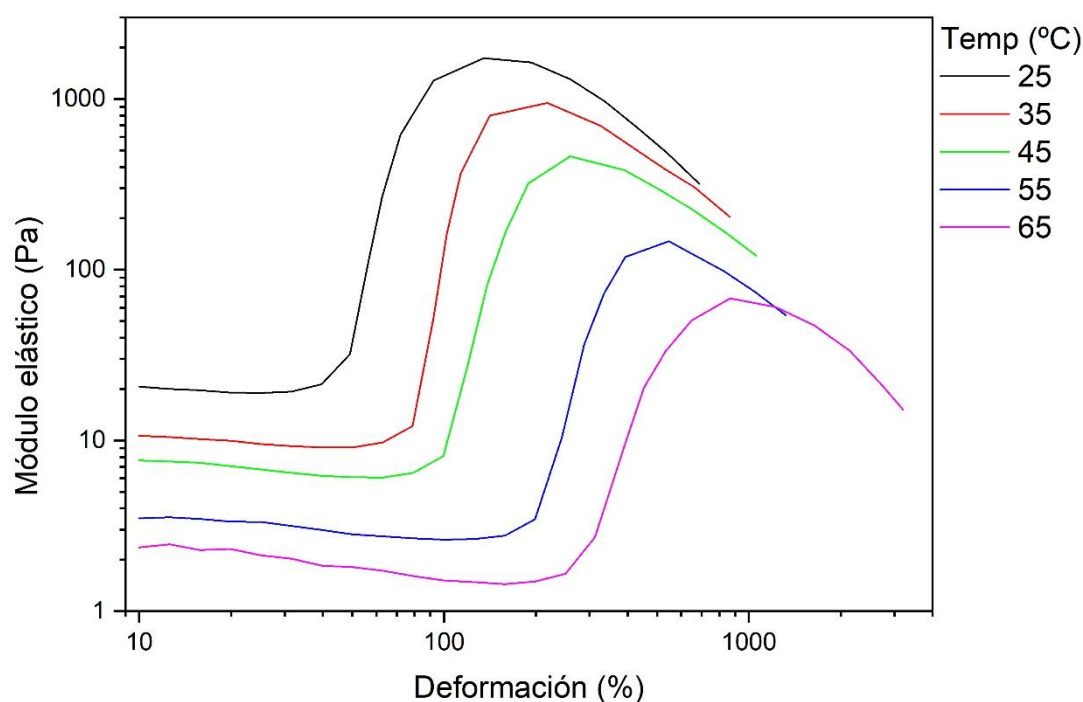


Fig. 6.25. Módulo elástico en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento a distintas temperaturas.

En la figura 6.25 se puede ver la evolución del módulo elástico en función de la deformación. En esta figura se puede comprobar, igual que sucedía con el módulo viscoso, que un aumento en la temperatura del ensayo disminuye el módulo elástico y propicia que su aparición se realice a deformaciones superiores.

Los valores máximos del módulo elástico son 1637.76 Pa en el ensayo a 25 grados, 949.31 Pa en el ensayo a 35 grados, 461.95 Pa en el ensayo a 45 grados, 146.69 Pa en el ensayo a 55 grados y 68.12 Pa en el ensayo a 65 grados.

Con los valores del módulo elástico y el módulo viscoso se puede obtener el ángulo de fase para los distintos ensayos. El ángulo de fase para el ensayo a 25 grados Celsius es de 43.63°, 46.75° en el ensayo a 35 grados Celsius, 50.01° en el ensayo a 45 grados Celsius, 58.33° en el ensayo a 55 grados Celsius y 68.08° en el ensayo a 65 grados Celsius.

Como se puede comprobar, en el ensayo realizado a 25 grados el ángulo de fase es menor a 45°, por lo tanto, el comportamiento de esta muestra a 25 grados se acerca más al de un sólido elástico que al de un líquido viscoso, lo que hace que su capacidad para almacenar energía sea superior que su capacidad para disipar energía. Con el ángulo de fase obtenido para los diferentes ensayos se puede ver como a medida que se aumenta la temperatura aumenta el ángulo de fase.

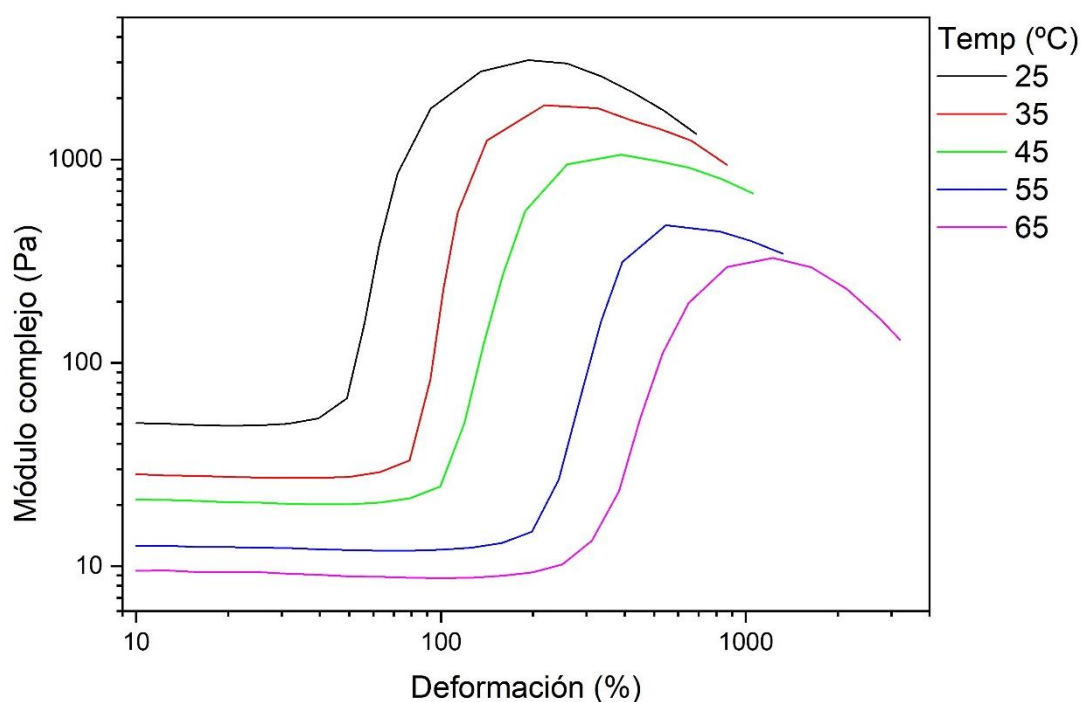


Fig. 6.26. Módulo viscoso en función de la deformación oscilatoria para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento a distintas temperaturas.

En la figura 6.26. se puede ver la variación del módulo complejo para las diferentes temperaturas en función de la deformación. Se puede ver como el módulo complejo toma valores más bajos a medida que se aumenta la temperatura a la que se realiza el ensayo.

Los valores máximos del módulo complejo que se obtienen para estos ensayos son de 3084.77 Pa en el ensayo a 25 grados, 1852.76 Pa para el ensayo a 35 grados, 1058.52 Pa en el ensayo a 45 grados, 475.73 Pa en el ensayo a 55 grados y 327.82 Pa en el ensayo a 65 grados.

6.2.5. Comparación de los resultados para las diferentes muestras

Ahora se va a comparar los resultados obtenidos para las diferentes muestras a igualdad de temperatura, 25 grados Celsius, de esta manera se determinará el efecto de la fracción másica en los ensayos reológicos oscilatorios.

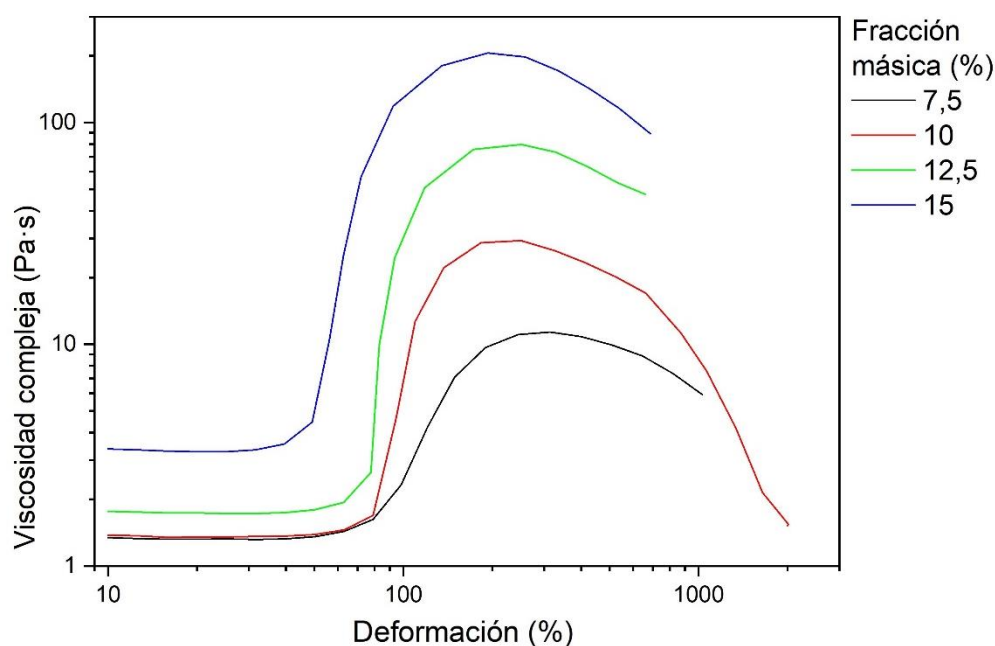


Fig. 6.27. Comparación de las viscosidades complejas para las distintas muestras con una fracción másica del 7.5%, 10%, 12.5% y 15% en el ensayo a 25°C.

En la figura 6.27. se puede ver los resultados obtenidos en los ensayos realizados a 25 grados, en ella se puede ver como las muestras con una mayor fracción másica tienen una viscosidad compleja mucho mayor.

Los valores de la viscosidad compleja a los que comienza el comportamiento dilatante son de 1.62 Pa·s en el ensayo realizado a la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento, 1.45 Pa·s en el ensayo realizado a la muestra con una fracción másica del 10 por ciento, 1.93 Pa·s en el ensayo a la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento y 4.46 Pa·s en el ensayo a la muestra con una fracción másica del

Los valores máximos de la viscosidad compleja son 11.33 Pa·s para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento, para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento el valor máximo de la viscosidad compleja es de 29.37 Pa·s, 79.65 Pa·s para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento y 205.65 Pa·s para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.

El comportamiento dilatante comienza a unas deformaciones del 79.02 por ciento para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento, al 62.97 por ciento para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento, 62.79 por ciento para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento y 49.13 por ciento para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.

El comportamiento dilatante termina para unas deformaciones del 314.8 por ciento para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento, 250.1 por ciento para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento, 250.7 por ciento para la

muestra con la fracción másica del 12.5 por ciento y 193.45 por ciento para la muestra con la fracción másica del 15 por ciento.

Como se puede observar una mayor fracción másica propicia que aparezca a menores deformaciones el efecto dilatante y también que termine a menores deformaciones, aunque su efecto en este aspecto no es tan marcado como el de la temperatura.

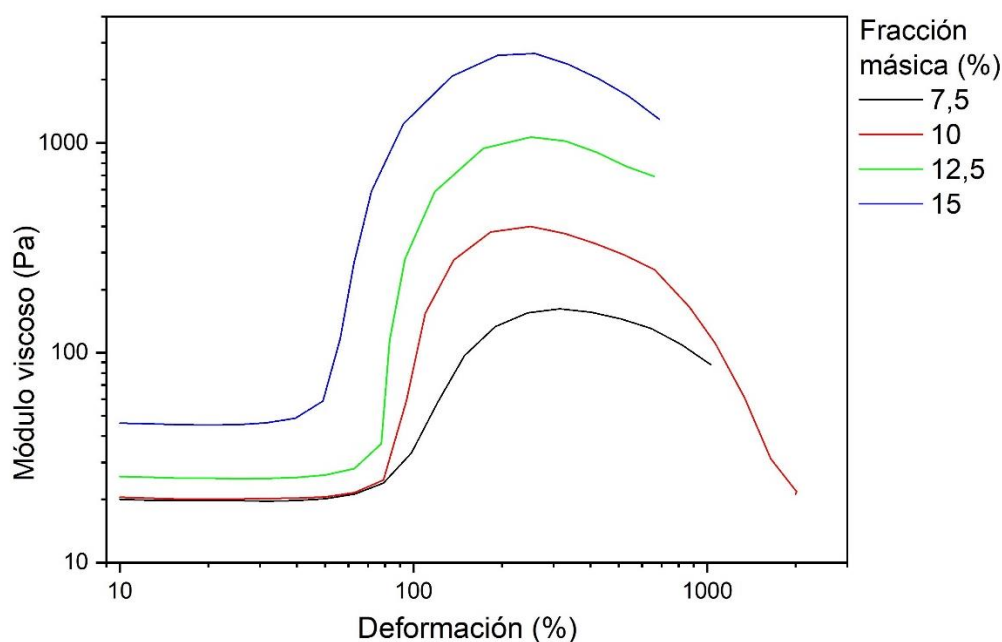


Fig. 6.28. Comparación del módulo viscoso a una temperatura de 25°C para las distintas muestras con una fracción másica de 7.5%, 10%, 12.5% y 15%.

En la figura 6.28. se puede ver la variación del módulo viscoso para las distintas muestras a la misma temperatura. En ella se puede observar como las muestras con una mayor fracción másica tienen unos valores mayores de este módulo de viscosidad. También se puede ver reflejado como el comportamiento dilatante se produce a velocidades menores en las muestras con una mayor fracción másica.

Los valores máximos del módulo viscoso 161.84 Pa para la mezcla con una fracción másica del 7.5 por ciento, 400.26 Pa para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento, 1066.42 Pa en la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento y 2663.09 Pa para la mezcla con una fracción másica del 15 por ciento.

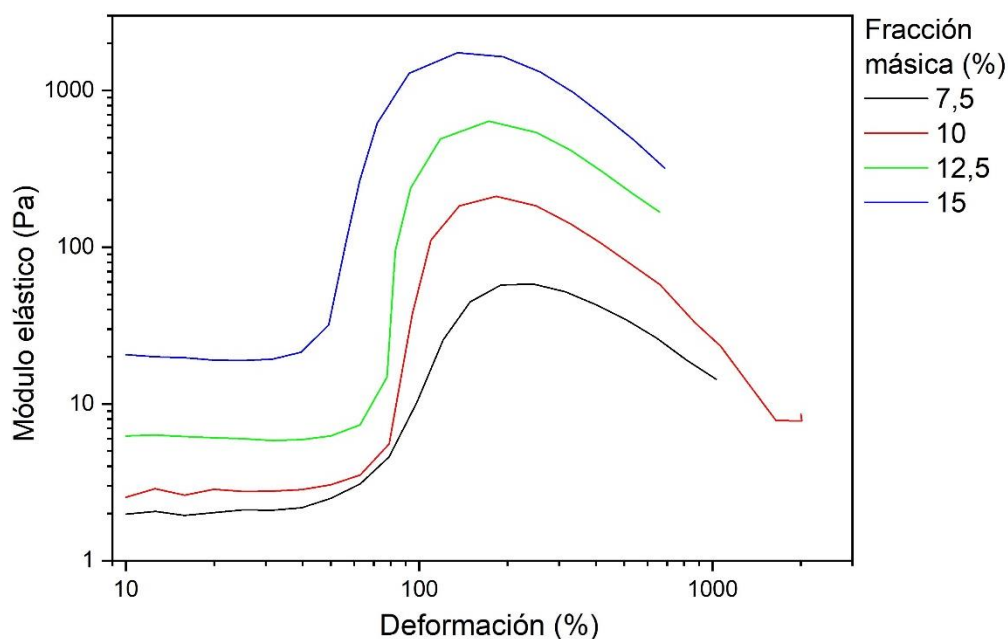


Fig. 6.29. Comparación del módulo elástico a una temperatura de 25°C para las distintas muestras con una fracción máxica de 7.5%, 10%, 12.5% y 15%.

En la figura 6.29. se ve la variación del módulo elástico en las diferentes muestras. Como sucede con el módulo viscoso, el módulo elástico es mayor cuanto mayor es la fracción máxica de la muestra empleada, llegando a haber una diferentes ordenes de magnitud para las distintas fracciones máxicas

El módulo elástico tiene como valores máxicos de cada mezcla 58.19 Pa para la muestra con una fracción máxica del 7.5 por ciento, 210.97 en la muestra con una fracción máxica del 10 por ciento, 635.79 Pa en la muestra con una fracción máxica del 12.5 por ciento y un valor de 1637.76 Pa para la muestra con una fracción máxica del 15 por ciento.

Analizando los valores del módulo elástico y del módulo viscoso se puede obtener los ángulos de fase para las diferentes muestras y así analizar su comportamiento más en profundidad. El ángulo de fase tiene un valor de 65.18° para la muestra con una fracción máxica del 7.5 por ciento, 54.23° para la muestra con la fracción máxica del 10 por ciento durante el periodo en el que muestra un comportamiento dilatante, 49.62° para la muestra con una fracción máxica del 12.5 por ciento y 43.63° para la muestra con la fracción máxica del 15 por ciento. Con estos resultados se puede observar una clara dependencia del ángulo de fase con la fracción máxica, disminuyendo el ángulo de fase a medida que se aumenta la fracción máxica hasta el punto en el que la muestra con una fracción máxica del 15 por ciento su comportamiento es más cercano al de un sólido elástico que al de un líquido viscoso, lo que hace que tenga un mejor comportamiento a la hora de almacenar energía que a la hora de disiparla.

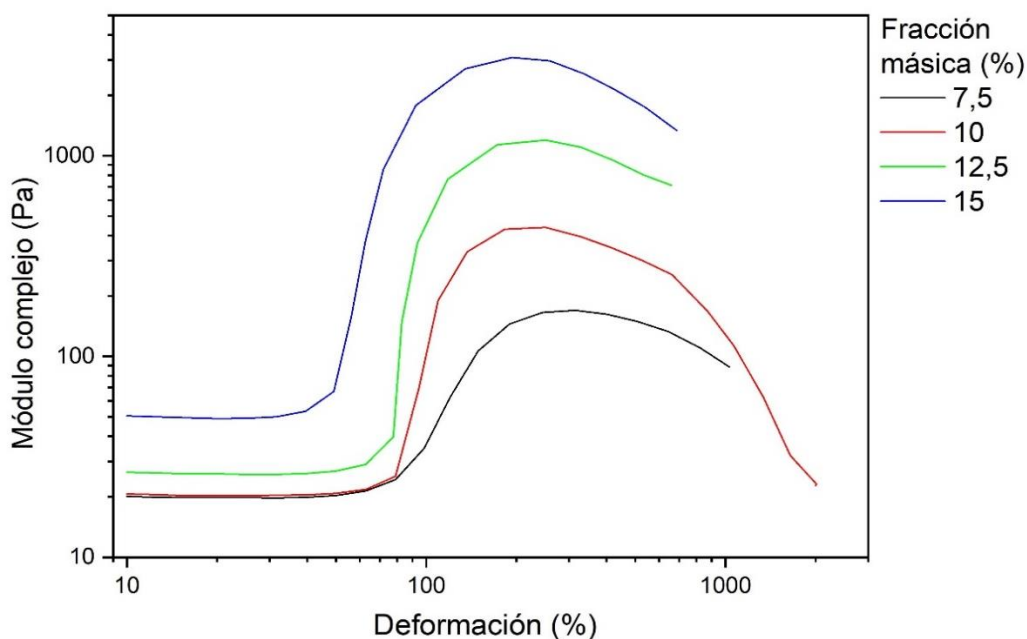


Fig. 6.30. Comparación del módulo complejo a una temperatura de 25°C para las distintas muestras con una fracción másica de 7.5%, 10%, 12.5% y 15%.

En la figura 6.30. se puede ver la variación del módulo complejo para las diferentes muestras en los ensayos realizados a 25 grados. Se puede ver como el módulo complejo toma valores más altos a medida que se aumenta la fracción másica de la muestra a ensayar.

Los valores máxicos del módulo complejo para los ensayos realizados a las diferentes muestras son 169.98 Pa durante el ensayo realizado a la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento, 440.41 Pa para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento, 1194.82 Pa en la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento y, por último, 3084.77 Pa en el ensayo realizado a la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.

6.3. Resumen de los resultados obtenidos

A continuación, se van a presentar los resultados obtenidos para los distintos ensayos en forma de tablas y gráficas de modo que sea más fácil su visualización.

6.3.1. Resultados obtenidos en ensayos rotatorios para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento

Resultados en ensayos rotatorios en la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento

Temp. (°C)	η mín. (Pa·s)	η máx. (Pa·s)	γ mín. (1/s)	γ máx. (1/s)	τ mín (Pa)
25	3.96	30.54	1.18	7.79	4.68
35	1.41	8.7	3.62	30.49	5.11
45	1.04	3.82	13.85	76.94	14.36
55	0.6	1.89	26.03	155.44	15.71
65	0.41	0.99	47.45	290.3	19.4

Tabla 6.1. Resultados ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.

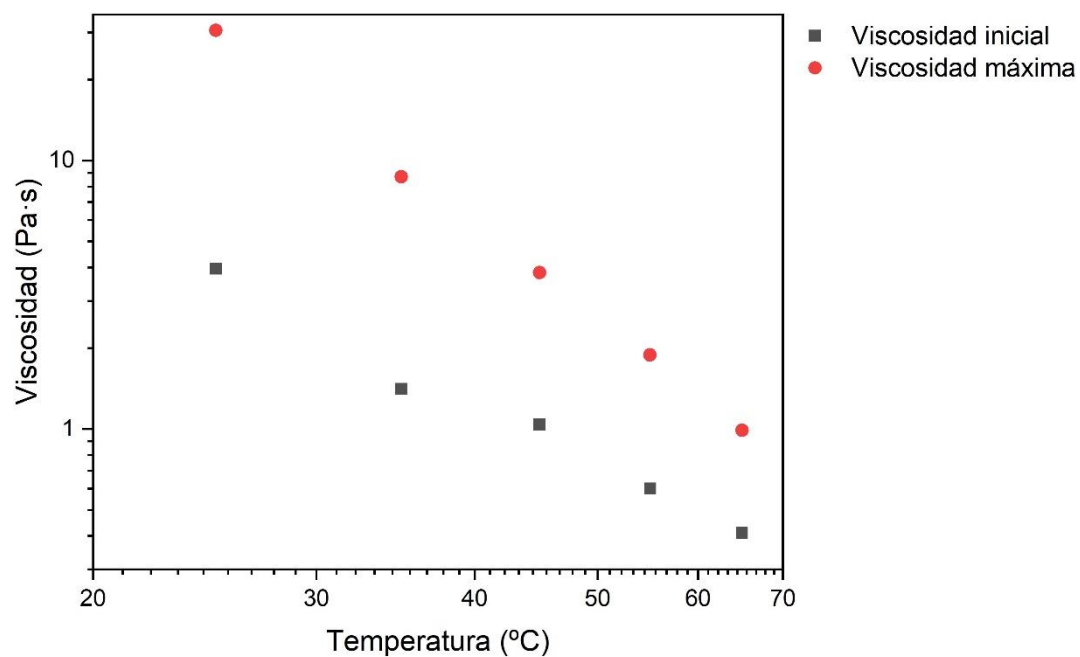


Fig. 6.31. Viscosidad máxima y viscosidad inicial obtenida en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.

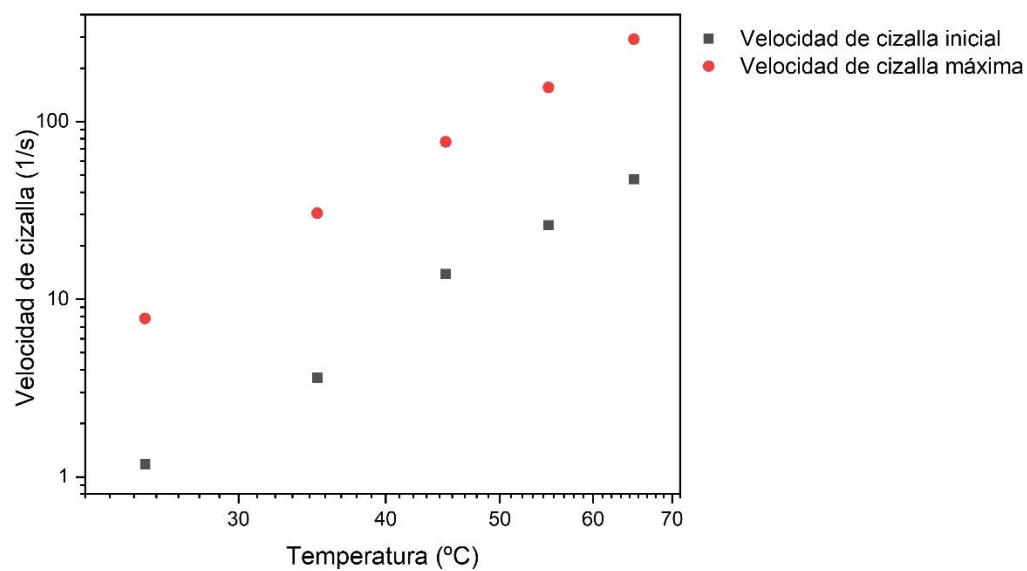


Fig. 6.32. Velocidad de cizalla máxima y velocidad de cizalla inicial obtenida en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.

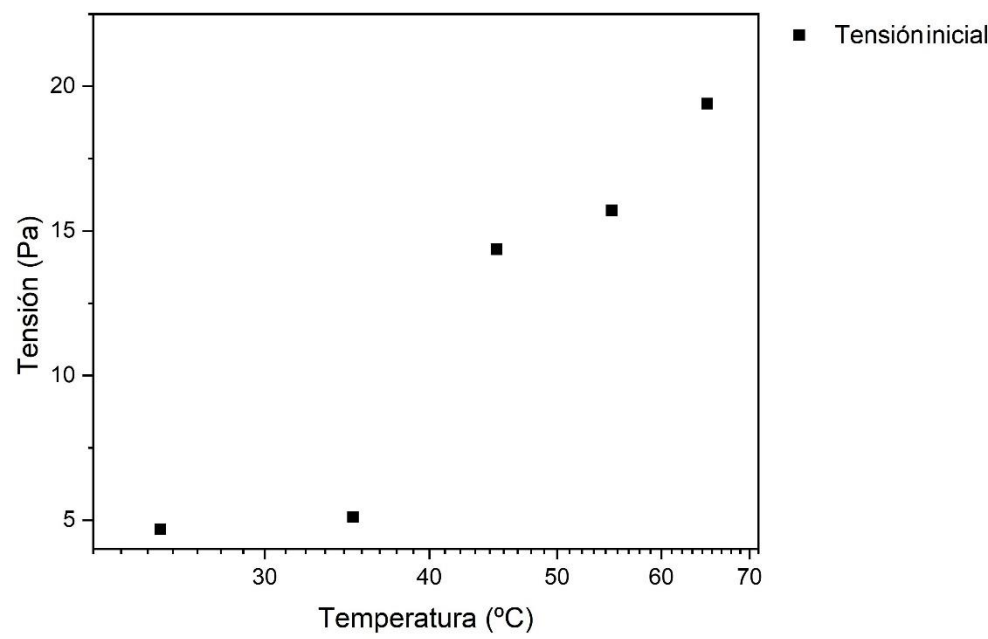


Fig. 6.33. Tensión máxima para los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.

6.3.2. Resultados obtenidos en ensayos rotatorios para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento

Resultados en ensayos rotatorios en la muestra con una fracción másica del 10 por ciento

Temp. (°C)	η mín. (Pa·s)	η máx. (Pa·s)	γ mín. (1/s)	γ máx. (1/s)	τ mín. (Pa)
25	3.5	76	1.88	5.57	6.56
35	1.89	33.98	3.44	15.67	6.49
45	0.87	9.66	11.46	38.83	9.92
55	0.75	4.74	34.16	111.68	25.51
65	0.47	2.47	58.56	190.51	28.5

Tabla 6.2. Resultados obtenidos en ensayos rotatorios para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.

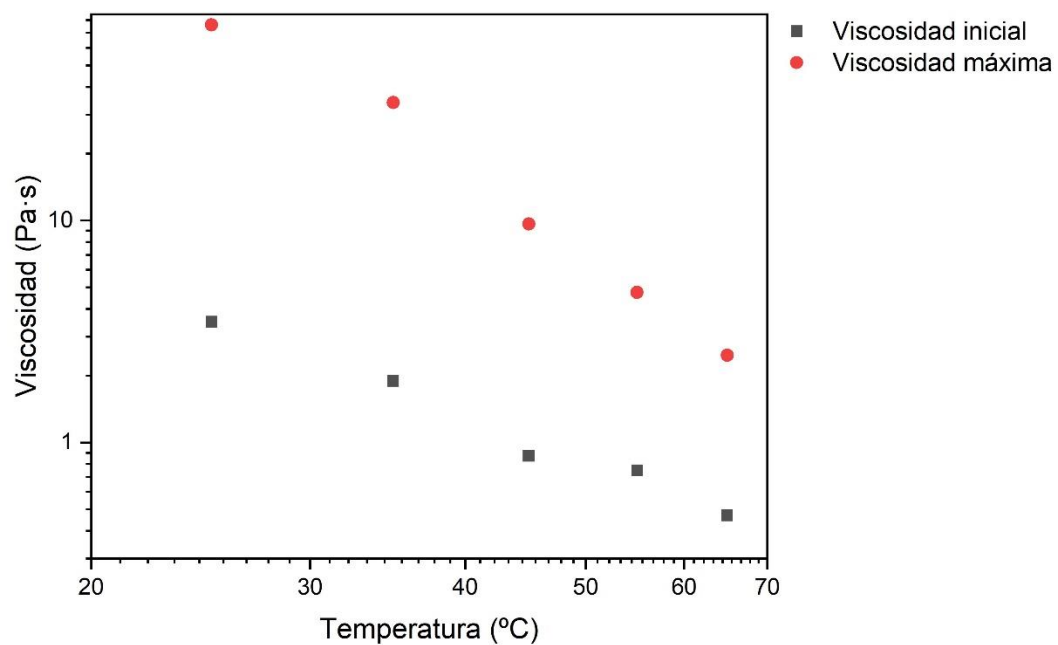


Fig. 6.34. Viscosidad máxima y viscosidad inicial obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.

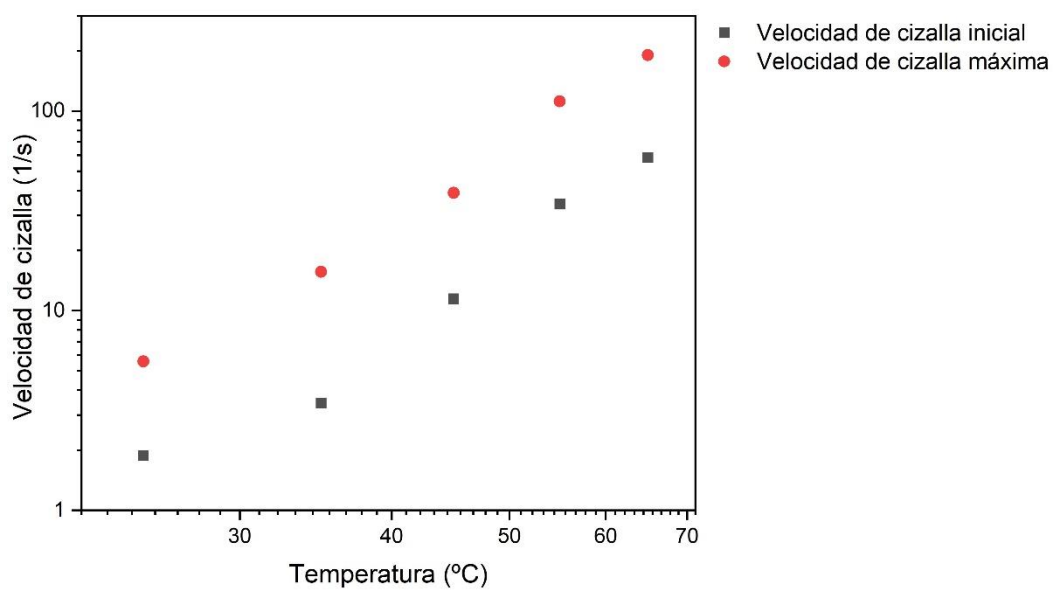


Fig. 6.35. Velocidad de cizalla máxima y velocidad de cizalla inicial obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.

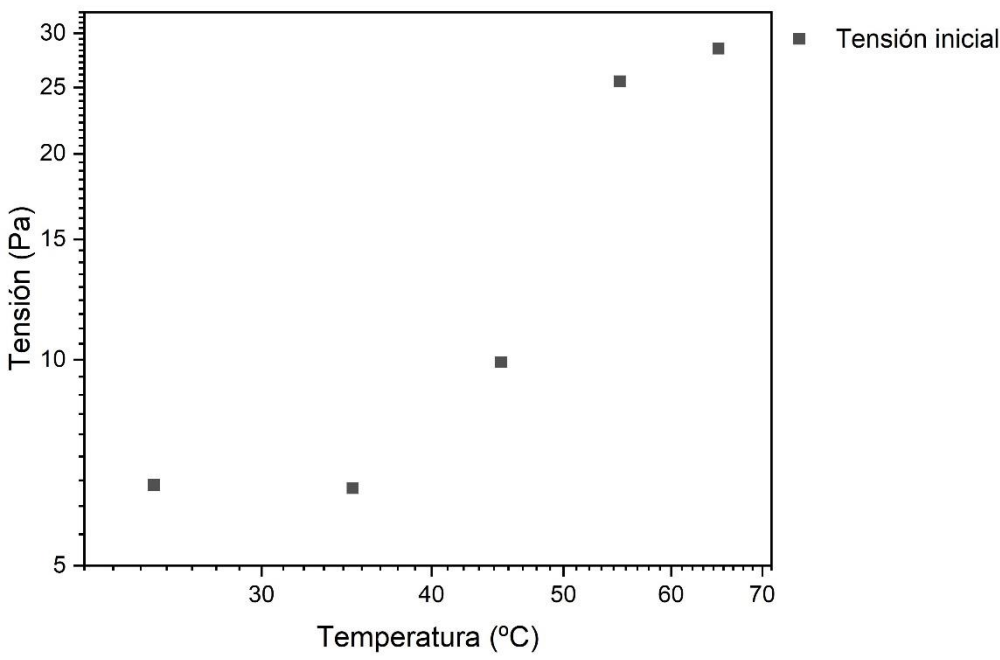


Fig. 6.36. Tensiones máximas obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.

6.3.3. Resultados obtenidos en ensayos rotatorios para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento

Resultados en ensayos rotatorios en la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento

Temp. (°C)	η mín. (Pa·s)	η máx. (Pa·s)	γ mín. (1/s)	γ máx. (1/s)	τ mín. (Pa)
25	3.76	232.66	1.57	5.76	5.91
35	2.51	69.12	4.66	17.27	11.72
45	1.21	25.12	9.53	37.66	11.57
55	0.69	11.83	18.74	79.99	12.91
65	0.53	6.54	52.88	144.21	28.06

Tabla 6.3. Resultados obtenidos en ensayos rotatorios para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.

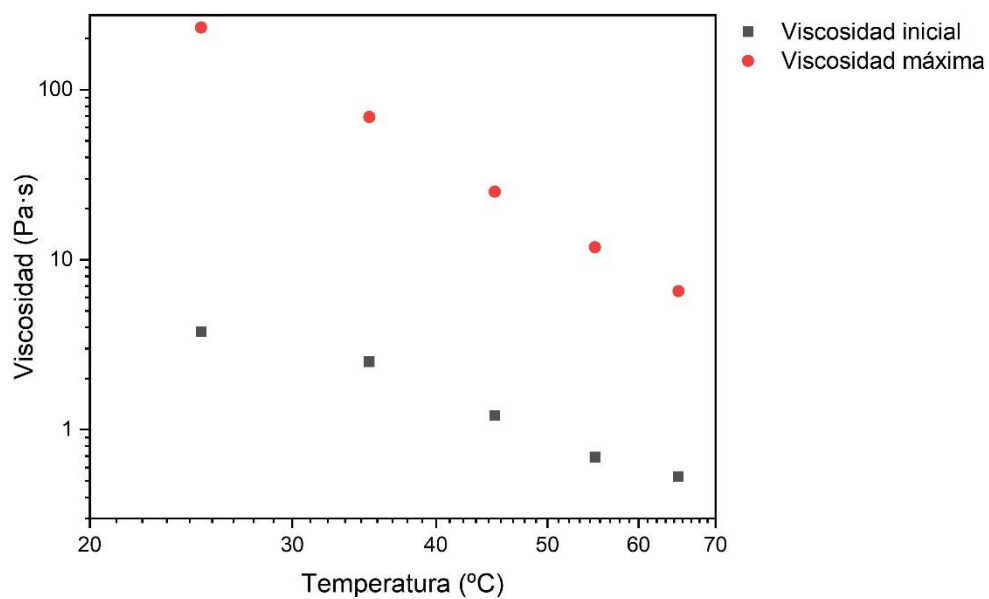


Fig. 6.37. Viscosidad máxima y viscosidad inicial obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.

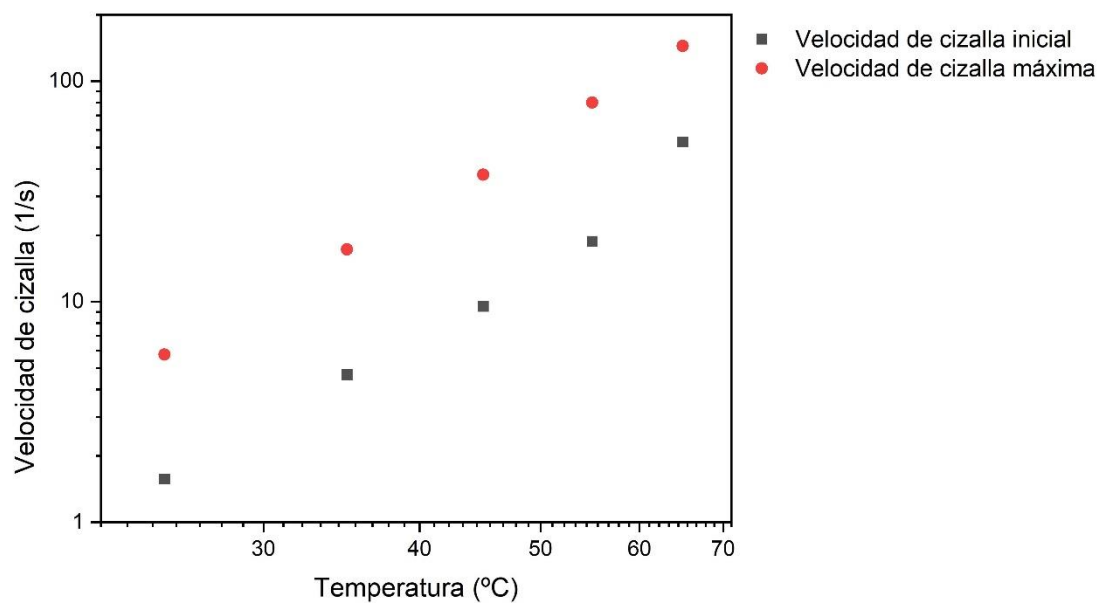


Fig. 6.38. Velocidad de cizalla máxima y velocidad de cizalla inicial obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.

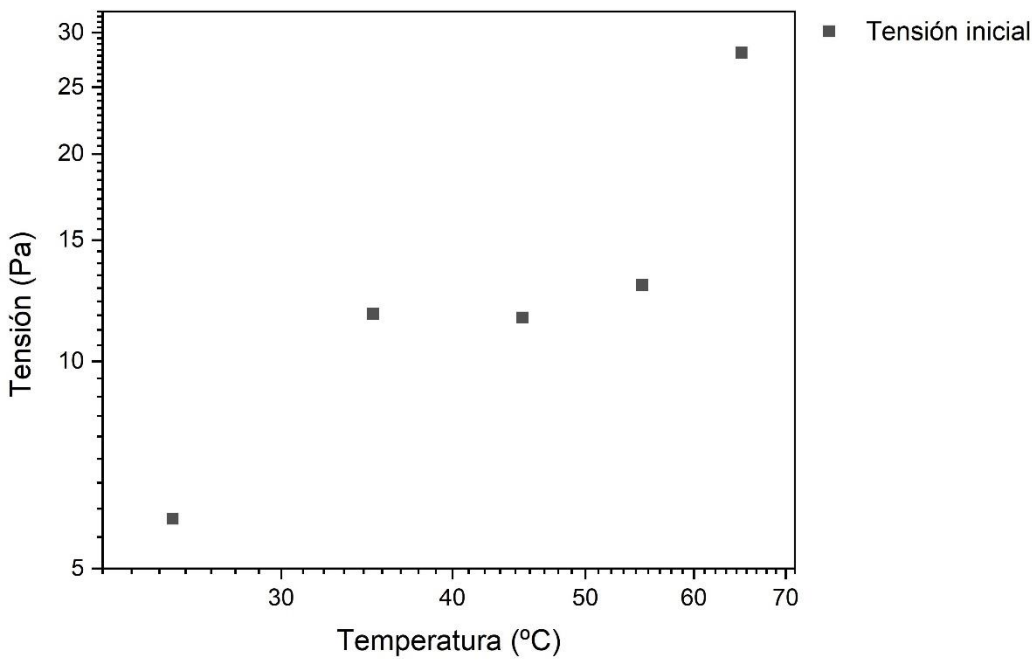


Fig. 6.39. Tensiones máximas obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.

6.3.4. Resultados obtenidos en ensayos rotatorios para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento

Resultados en ensayos rotatorios en la muestra con una fracción másica del 15 por ciento

Temp. (°C)	η mín. (Pa·s)	η máx. (Pa·s)	γ mín. (1/s)	γ máx. (1/s)	τ mín. (Pa)
25	6.76	552.6	1.24	6.83	8.37
35	3.93	145.85	2.67	20.56	10.48
45	2.34	79.14	7.06	37.88	16.5
55	1.51	25.76	12.23	65.37	18.4
65	1.11	16.32	25.96	129.83	28.95

Tabla 6.4. Resultados obtenidos en ensayos rotatorios para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.

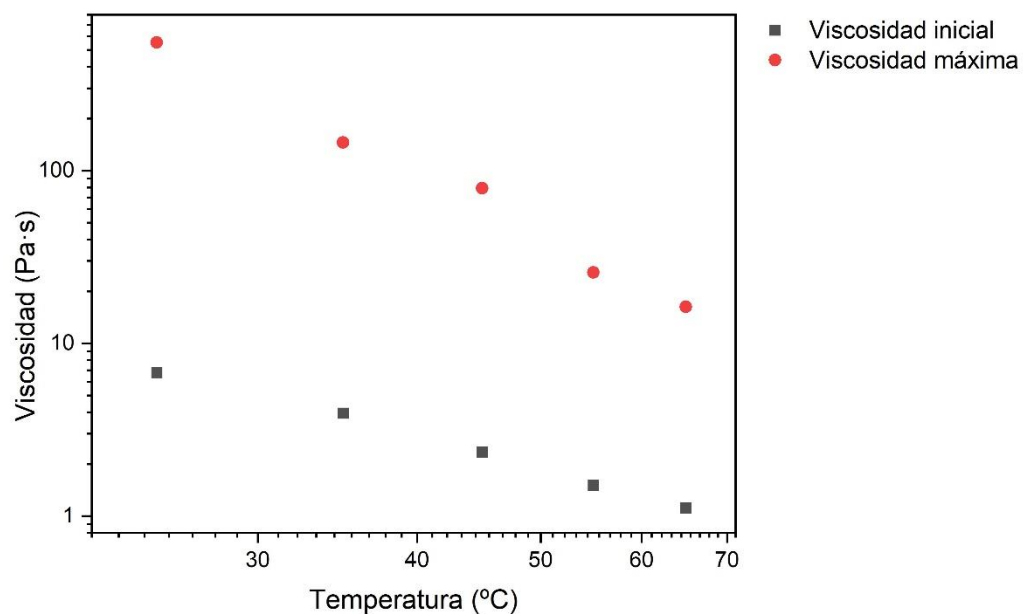


Fig. 6.40. Viscosidad máxima y viscosidad inicial obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.

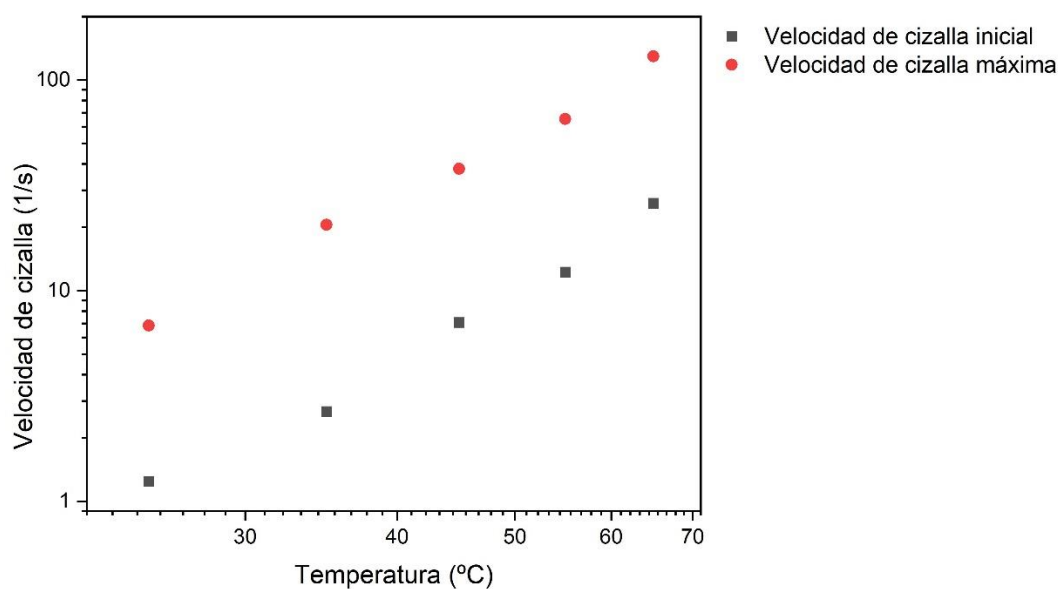


Fig. 6.41. Velocidad de cizalla máxima y velocidad de cizalla inicial obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.

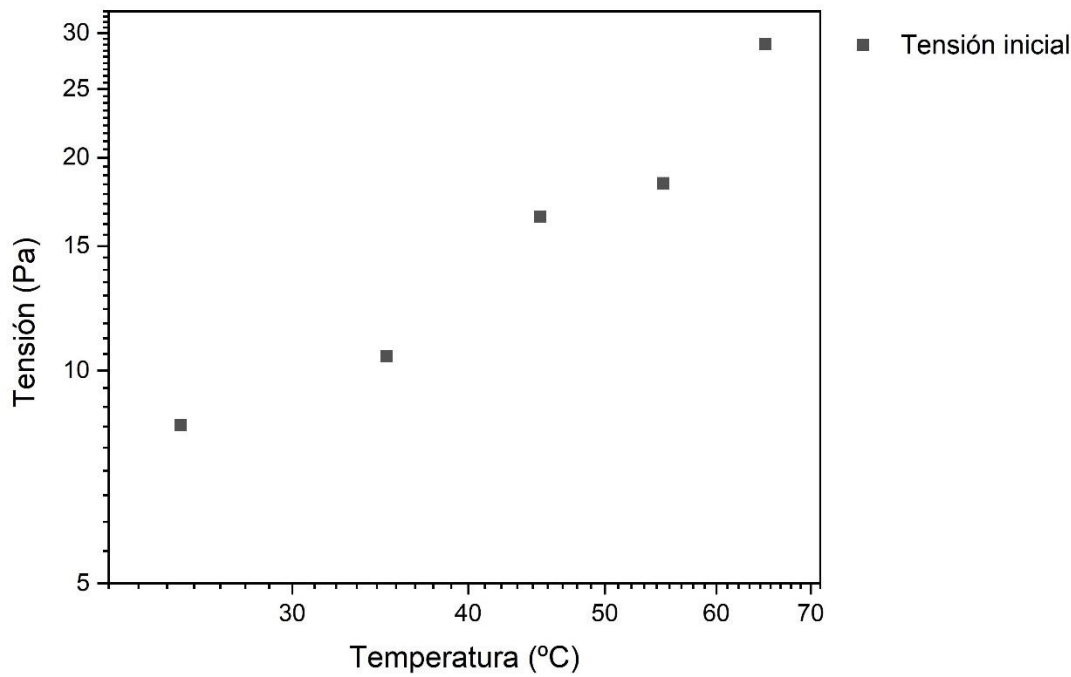


Fig. 6.42. Tensiones máximas obtenidas en los ensayos rotacionales en la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.

6.3.5. Comparación de resultados en ensayos rotatorios para muestras con distintas fracciones másicas.

Resultados ensayos rotatorios para las distintas muestras a 35 °C					
Fracción másica (%)	η mín. (Pa·s)	η máx. (Pa·s)	γ mín. (1/s)	γ máx. (1/s)	τ mín. (Pa)
7.5	1.41	8.7	3.62	6.83	5.11
10	1.89	33.89	3.44	15.67	6.49
12.5	2.51	69.12	4.66	17.27	11.72
15	3.93	145.85	2.67	20.56	10.48

Tabla 6.5. Resultados obtenidos en ensayos rotatorios para las distintas muestras a 35°C.

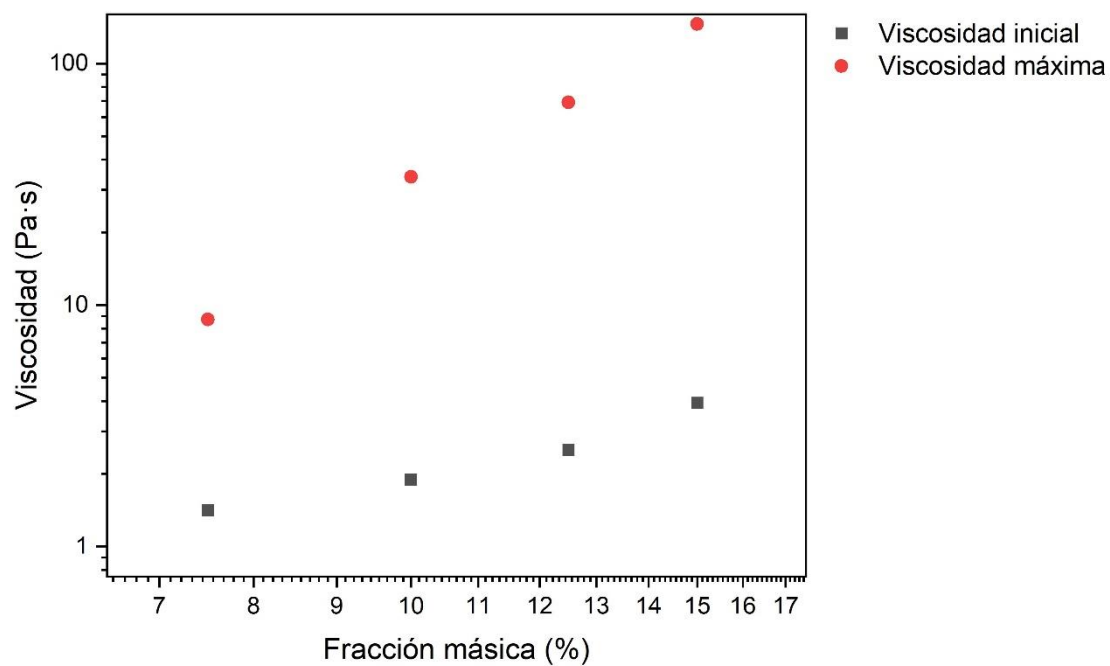


Fig. 6.43. Comparación de la viscosidad inicial y la viscosidad máxima para distintas fracciones másicas a 35 grados.

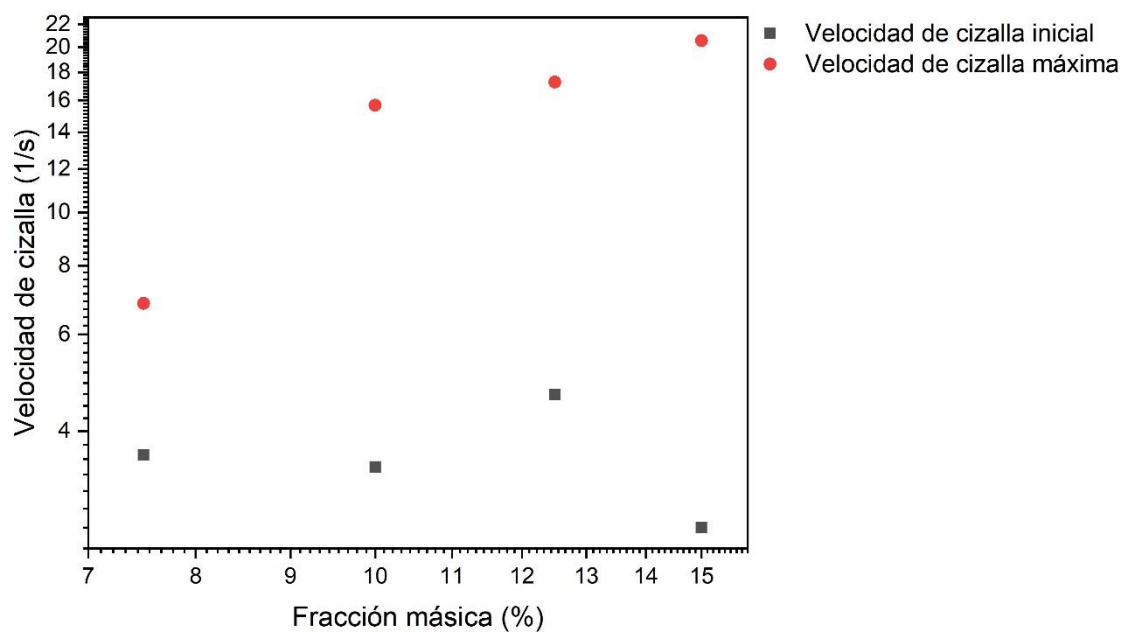


Fig. 6.44. Comparación de la velocidad de cizalla inicial y la velocidad de cizalla máxima para distintas fracciones másicas a 35 grados.

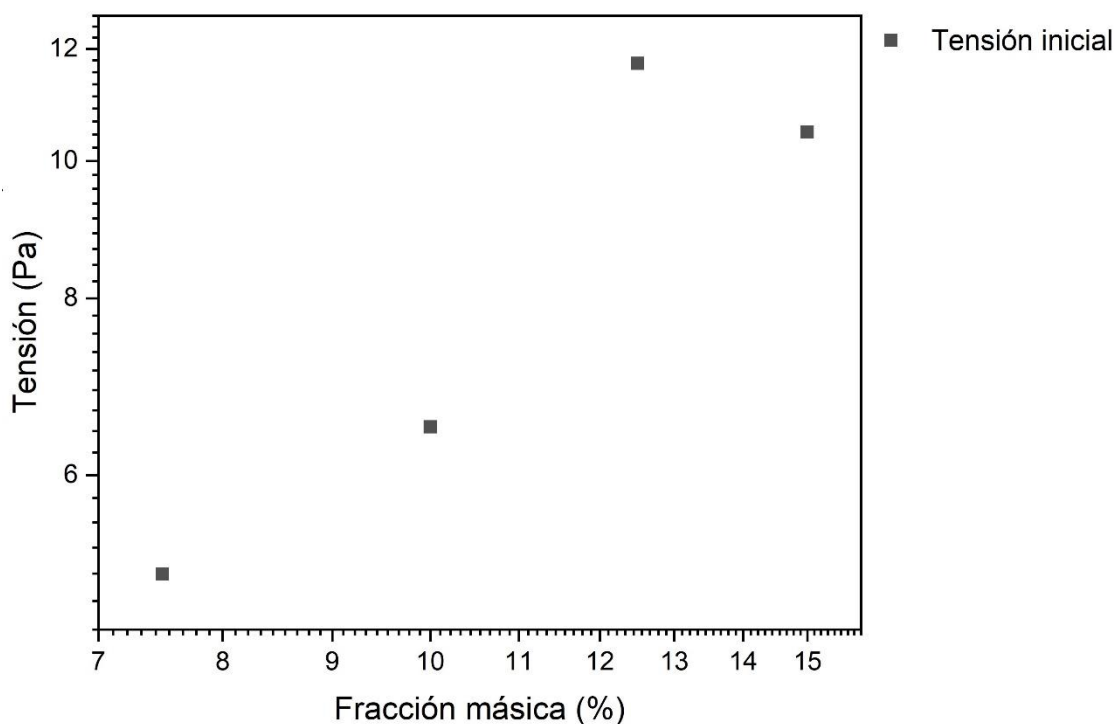


Fig. 6.45. Comparación de la tensión inicial para distintas fracciones másicas a 35 grados.

6.3.6. Resultados obtenidos en ensayos oscilatorios para la muestra con para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento

Resultados ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento

Temp. (°C)	η mín. (Pa·s)	η máx. (Pa·s)	Def. mín. (%)	Def. máx. (%)
25	1.62	11.33	79.02	314.8
35	1.3	5.78	156.71	498.13
45	0.73	2.89	249.66	999.24
55	0.48	1.54	396.48	1582.53
65	0.27	0.86	500.15	2508.01

Tabla 6.6. Resultados obtenidos para las viscosidades complejas y las deformaciones en los ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.

Resultados ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento

Temp. (°C)	G'' máx. (Pa)	G' máx. (Pa)	G^* máx. (Pa)	δ (°)
25	161.84	58.19	169.98	65.18
35	84.16	22.65	86.74	70.72
45	42.65	9.26	43.38	74.77
55	22.75	4.23	23.1	77.05
65	12.71	3.22	12.94	78.09

Tabla 6.7. Resultados obtenidos para los módulos y el ángulo de fase en los ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.

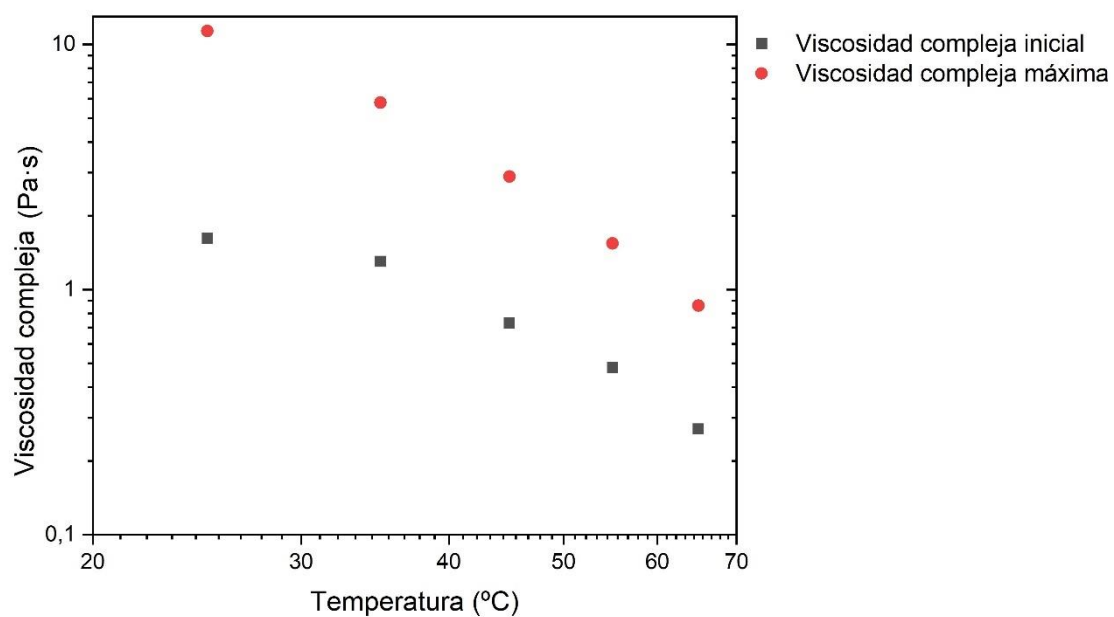


Fig. 6.46. Viscosidades complejas iniciales y máximas en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.

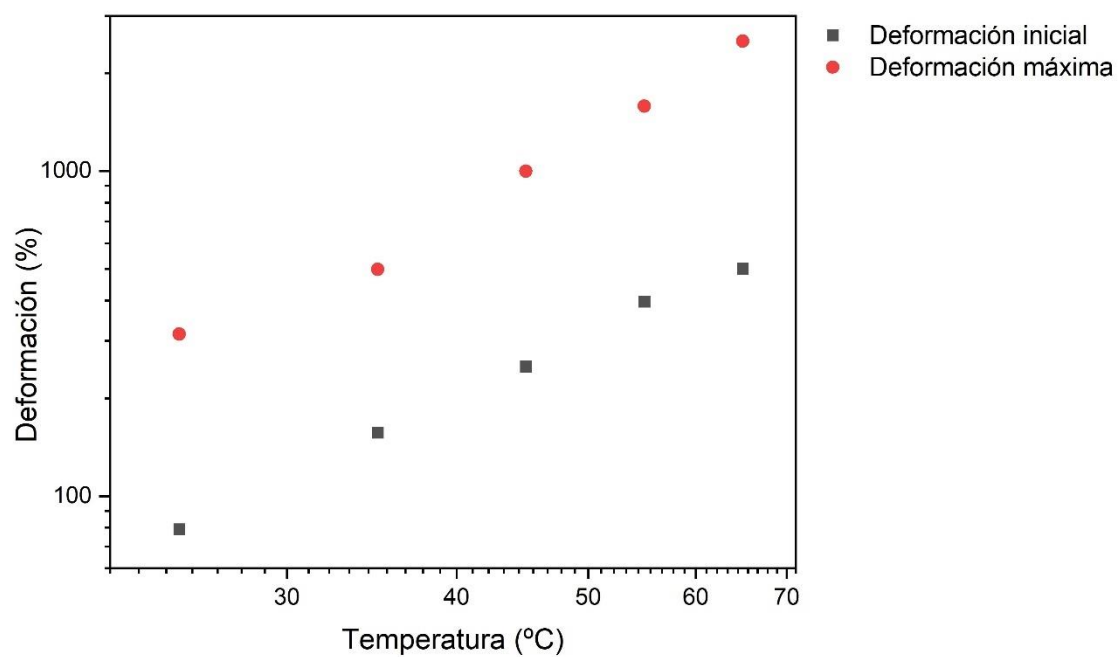


Fig. 6.47. Deformaciones iniciales y máximas en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.

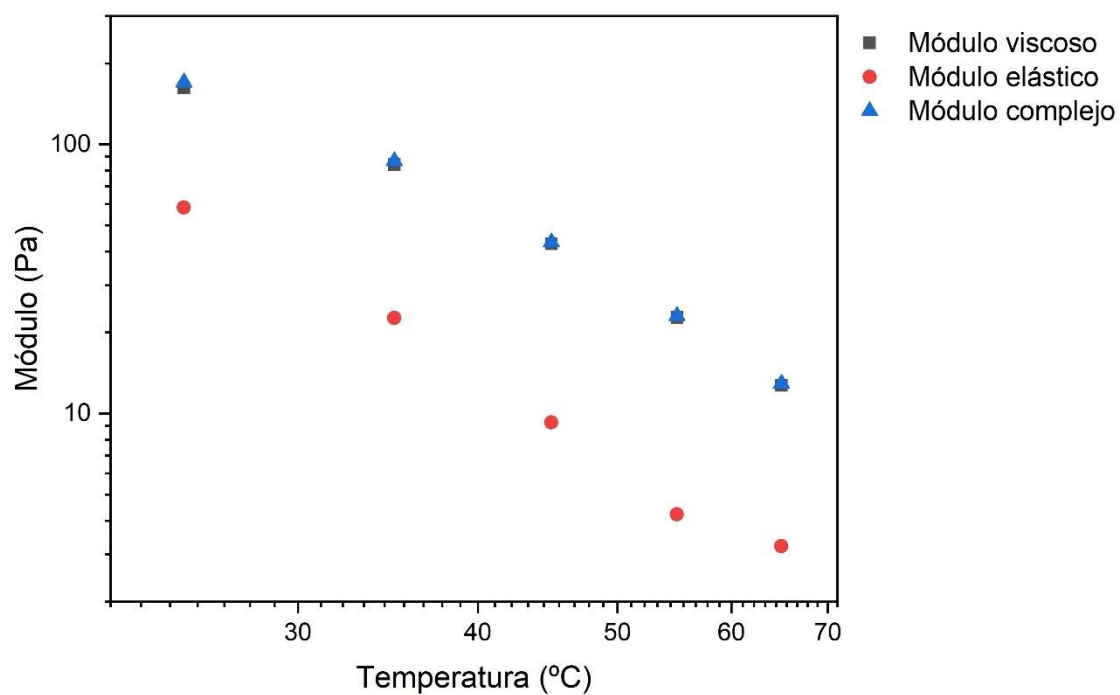


Fig. 6.48. Módulos viscoso, elástico y complejo en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.

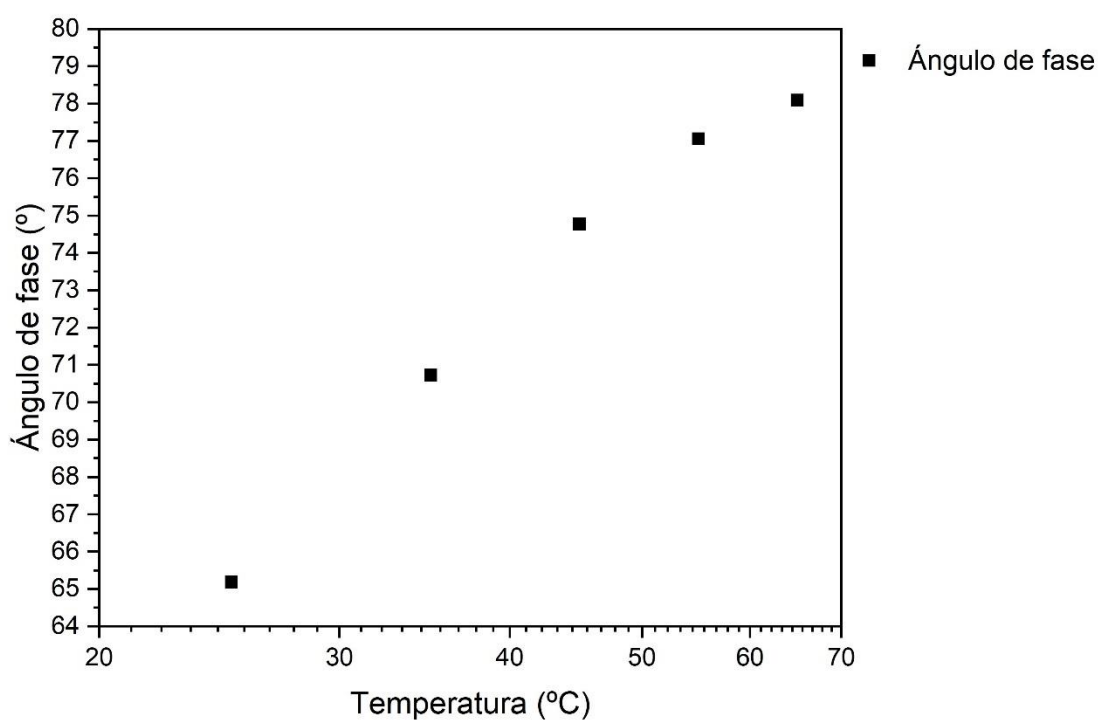


Fig. 6.49. Ángulo de fase en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 7.5 por ciento.

6.3.7. Resultados obtenidos en ensayos oscilatorios para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento

Resultados ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 10 por ciento

Temp. (°C)	η mín. (Pa·s)	η máx. (Pa·s)	Def. mín. (%)	Def. máx. (%)
25	1.45	29.37	62.97	250.1
35	1.04	22.07	79.29	314.6
45	0.78	6.99	198	499
55	0.8	4.31	391.47	1250.58
65	0.53	2.41	622.13	2511.59

Tabla 6.8. Resultados obtenidos para las viscosidades complejas y las deformaciones en los ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.

Resultados ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 10 por ciento

Temp. (°C)	G'' máx. (Pa)	G' máx. (Pa)	G* máx. (Pa)	δ (°)
25	400.26	210.97	440.41	54.23
35	307.42	143.03	330.86	56.47
45	99.57	37.58	104.9	60.16
55	61.68	13.26	64.6	73.18
65	35.94	5.24	36.18	78.67

Tabla 6.9. Resultados obtenidos para los módulos y el ángulo de fase en los ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.

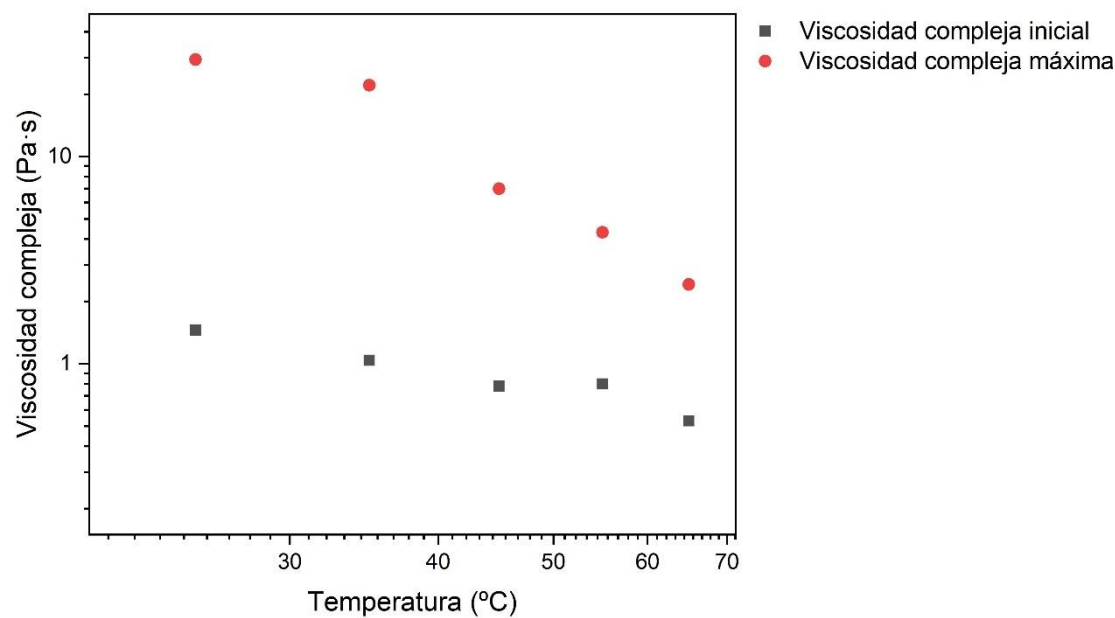


Fig. 6.50. Viscosidades complejas iniciales y máximas en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.

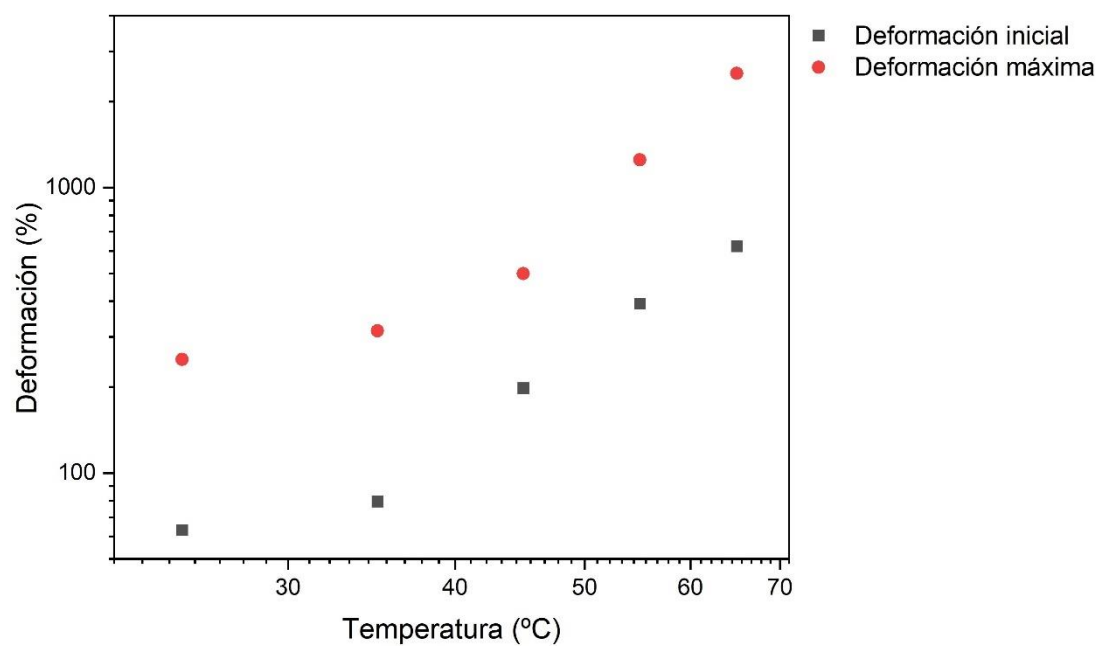


Fig. 6.51. Deformaciones iniciales y máximas en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.

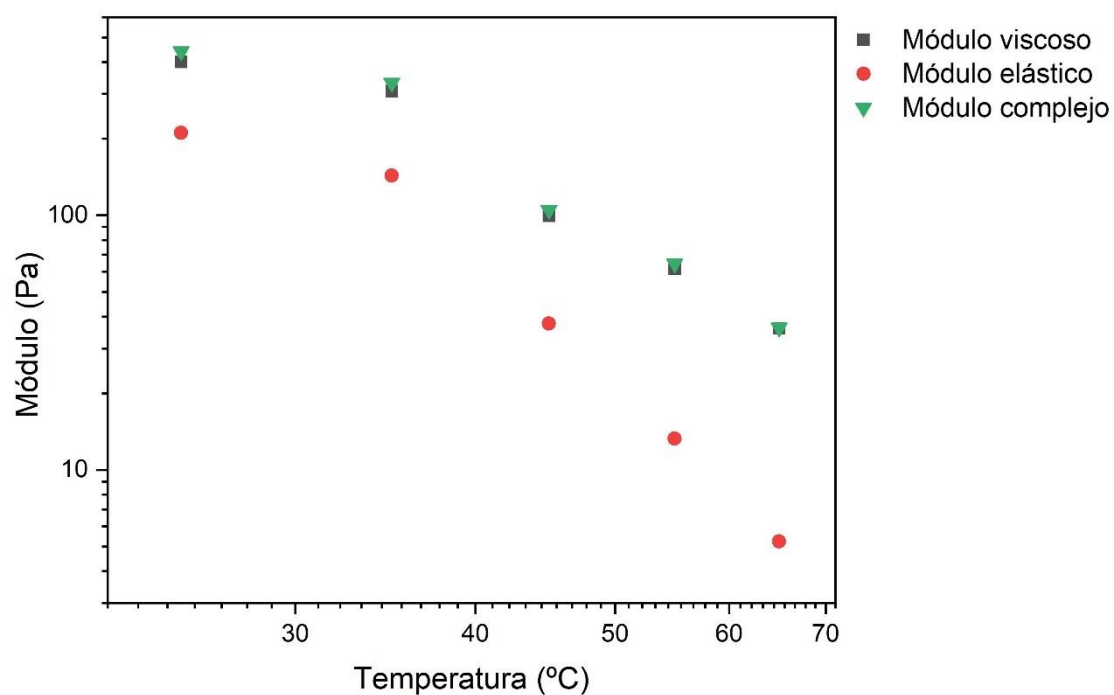


Fig. 6.52. Módulos viscoso, elástico y complejo en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.

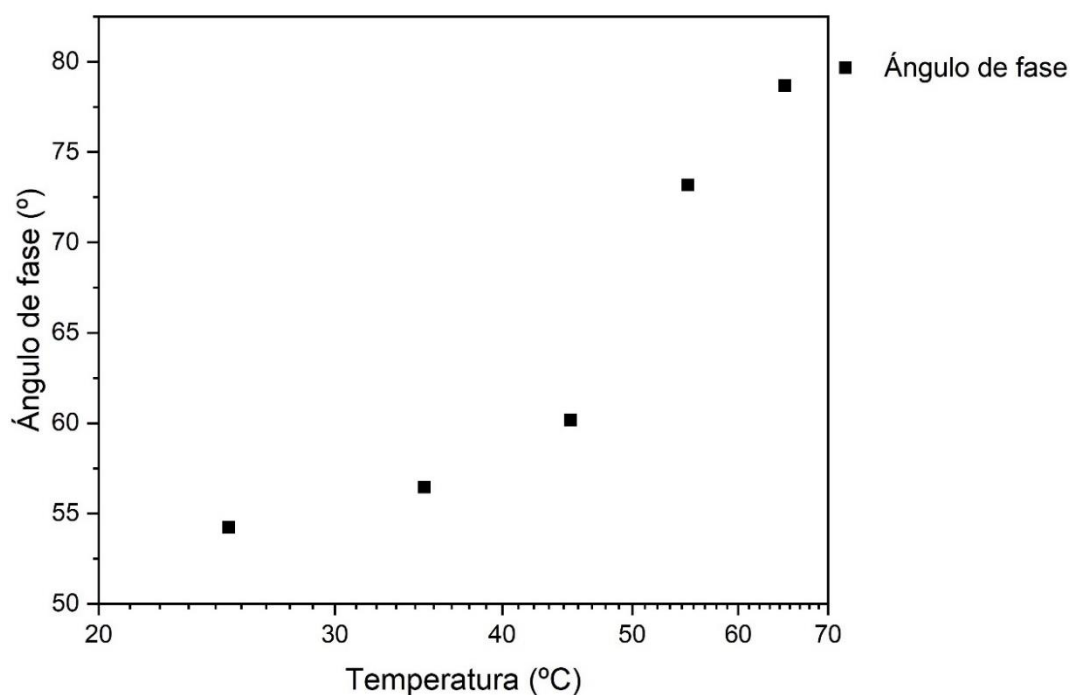


Fig. 6.53. Ángulo de fase en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 10 por ciento.

6.3.8. Resultados obtenidos en ensayos oscilatorios para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento

Resultados ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento

Temp. (°C)	η mín. (Pa·s)	η máx. (Pa·s)	Def. mín. (%)	Def. máx. (%)
25	1.93	79.65	62.79	250.7
35	1.74	49.51	130.5	306.98
45	0.79	27	156.96	354.13
55	0.54	11.11	312.93	997
65	0.4	6.74	397.08	1207.27

Tabla 6.10. Resultados obtenidos para las viscosidades complejas y las deformaciones en los ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.

Resultados ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento

Temp. (°C)	G'' máx. (Pa)	G' máx. (Pa)	G^* máx. (Pa)	δ (°)
25	1066.42	635.78	1194.82	49.62
35	678.8	351.39	742.65	53.13
45	386.52	156.86	409.51	58.27
55	166.38	43.54	166.67	67.06
65	99.64	19.98	101.11	71.5

Tabla 6.11. Resultados obtenidos para los módulos y el ángulo de fase en los ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.

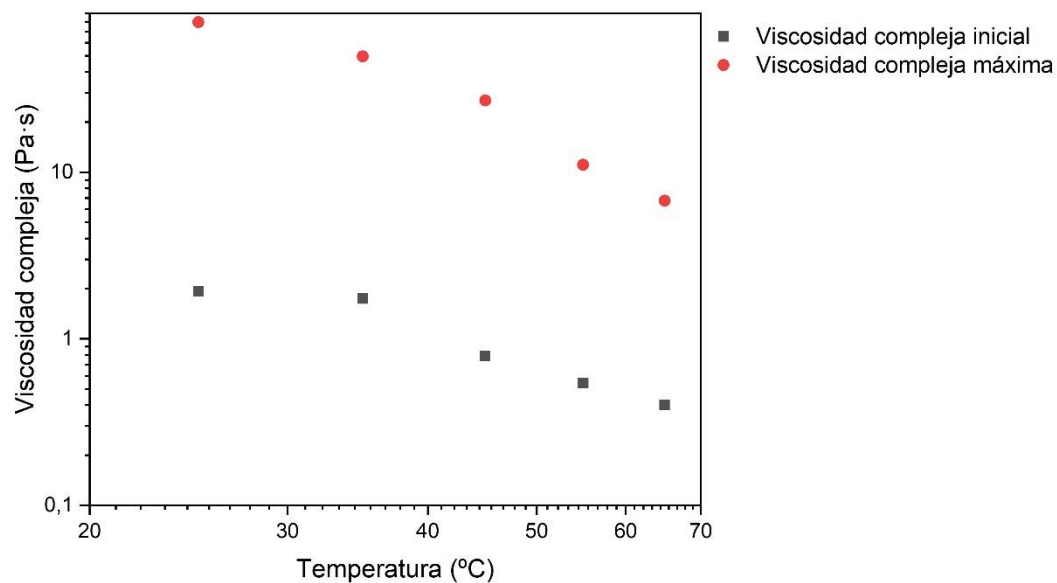


Fig. 6.54. Viscosidades complejas iniciales y máximas en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.

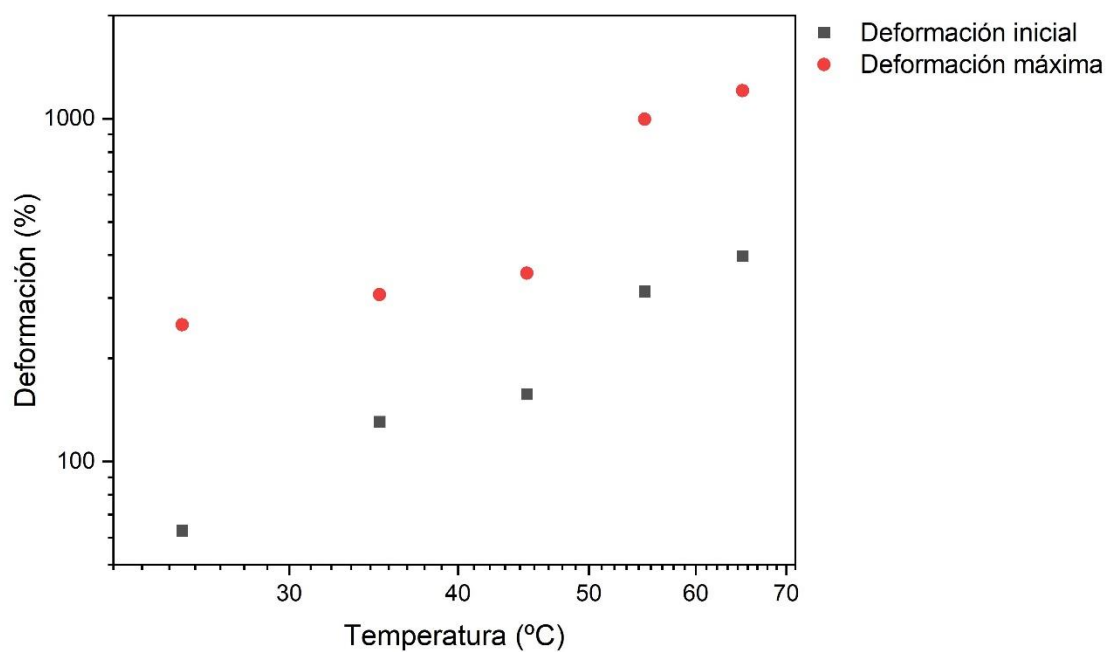


Fig. 6.55. Deformaciones iniciales y máximas en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.

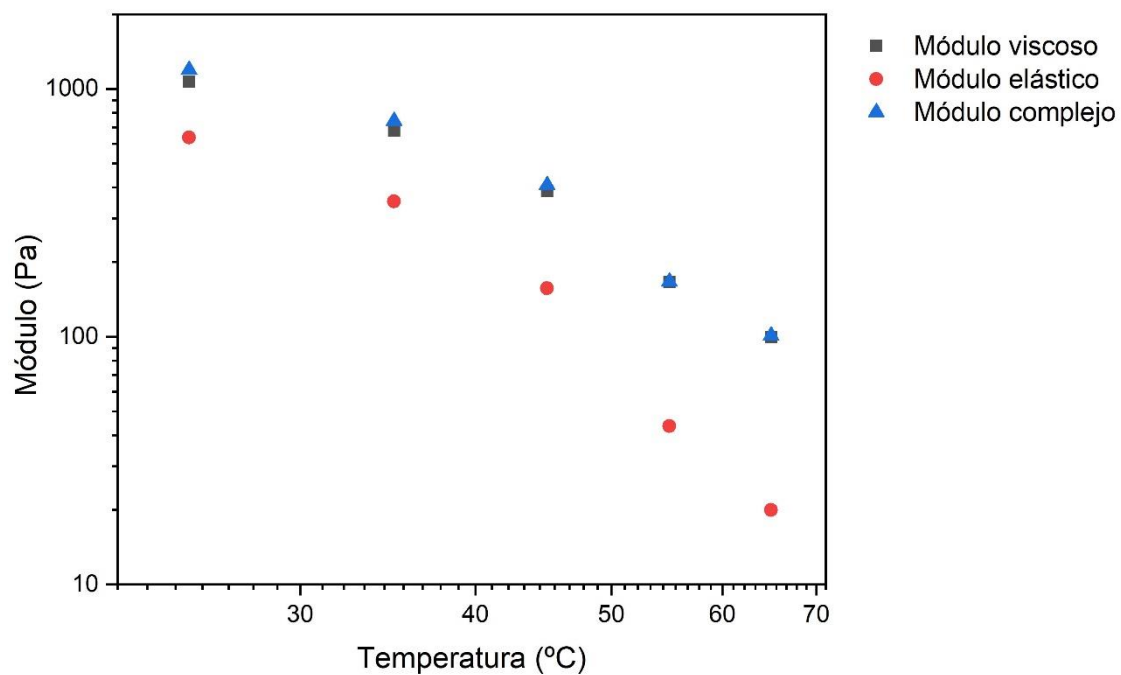


Fig. 6.56. Módulos viscoso, elástico y complejo en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.

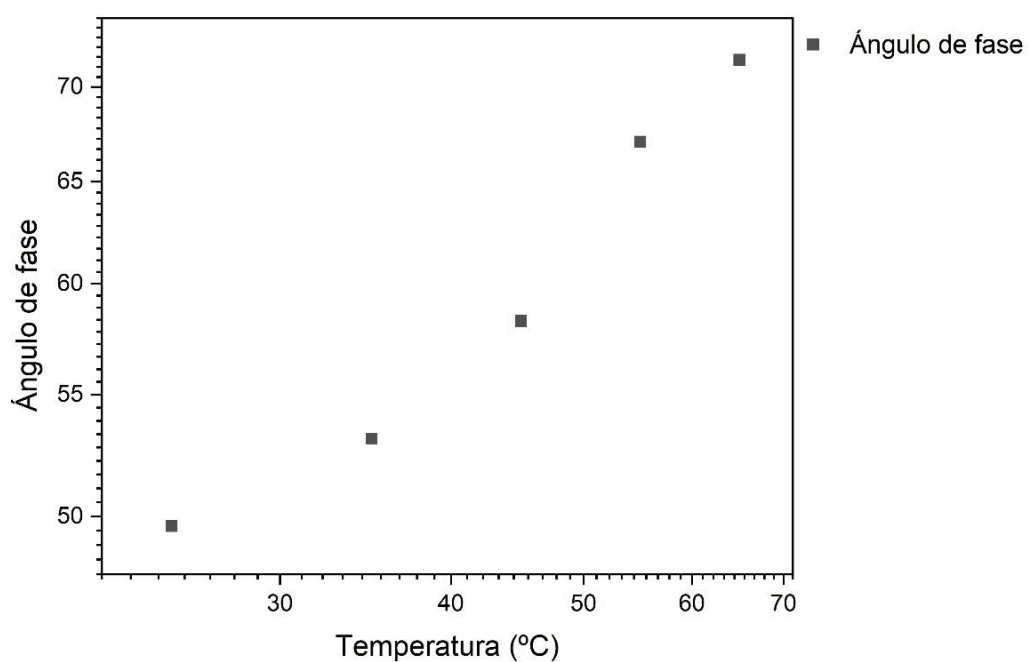


Fig. 6.57. Ángulo de fase en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 12.5 por ciento.

6.3.9. Resultados obtenidos en ensayos oscilatorios para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento

Resultados ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 15 por ciento

Temp. (°C)	η mín. (Pa·s)	η máx. (Pa·s)	Def. mín. (%)	Def. máx. (%)
25	4.46	205.65	49.13	193.45
35	2.2	123.52	78.82	218.03
45	1.64	70.57	99.28	390.1
55	0.99	31.72	198.57	546
65	0.68	21.85	250.28	1226.07

Tabla 6.12. Resultados obtenidos para las viscosidades complejas y las deformaciones en los ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.

Resultados ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 15 por ciento

Temp. (°C)	G'' máx. (Pa)	G' máx. (Pa)	G* máx. (Pa)	δ (°)
25	2663.09	1637.76	3084.77	43.63
35	1645.73	949.31	1852.76	46.75
45	986.64	461.95	1058.52	50.01
55	452.55	146.69	475.73	58.33
65	322.17	68.12	327.82	68.08

Tabla 6.13. Resultados obtenidos para los módulos y el ángulo de fase en los ensayos oscilatorios en la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.

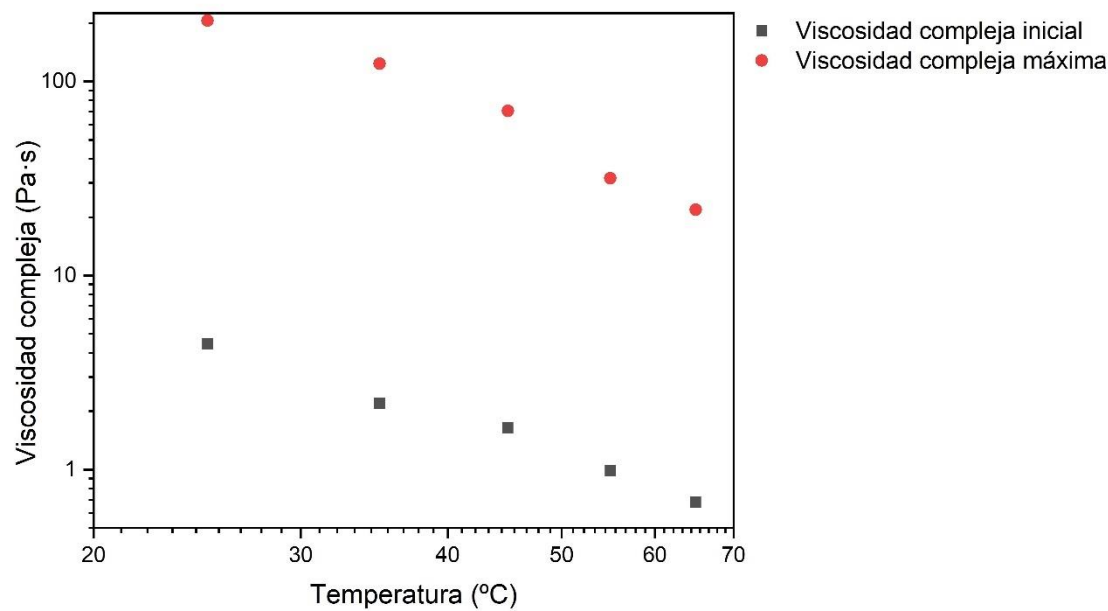


Fig. 6.58. Viscosidades complejas iniciales y máximas en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.

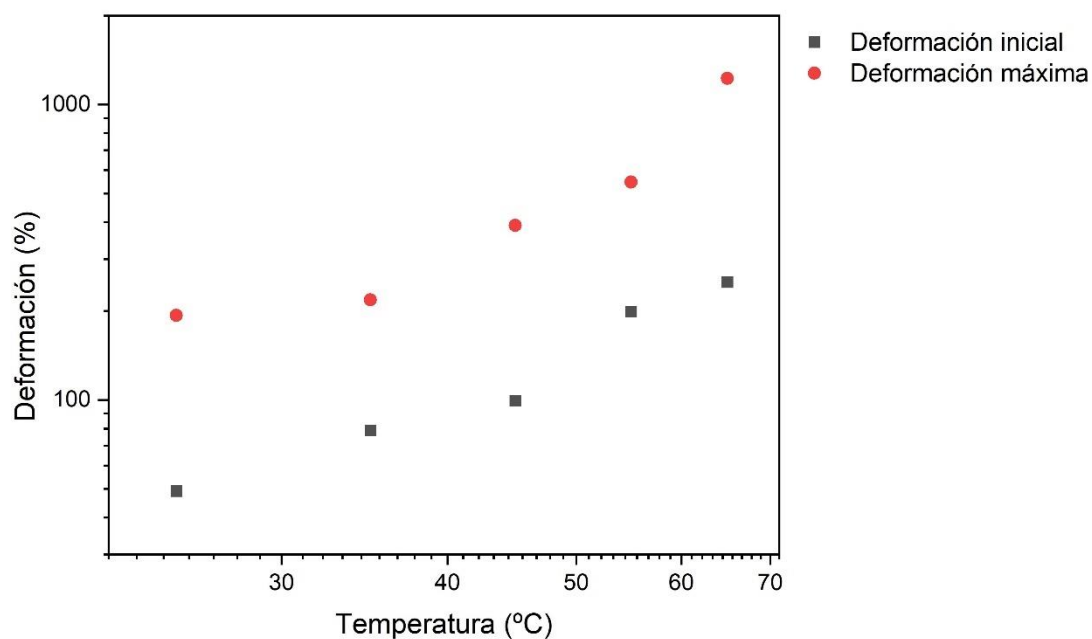


Fig. 6.59. Deformaciones iniciales y máximas en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.

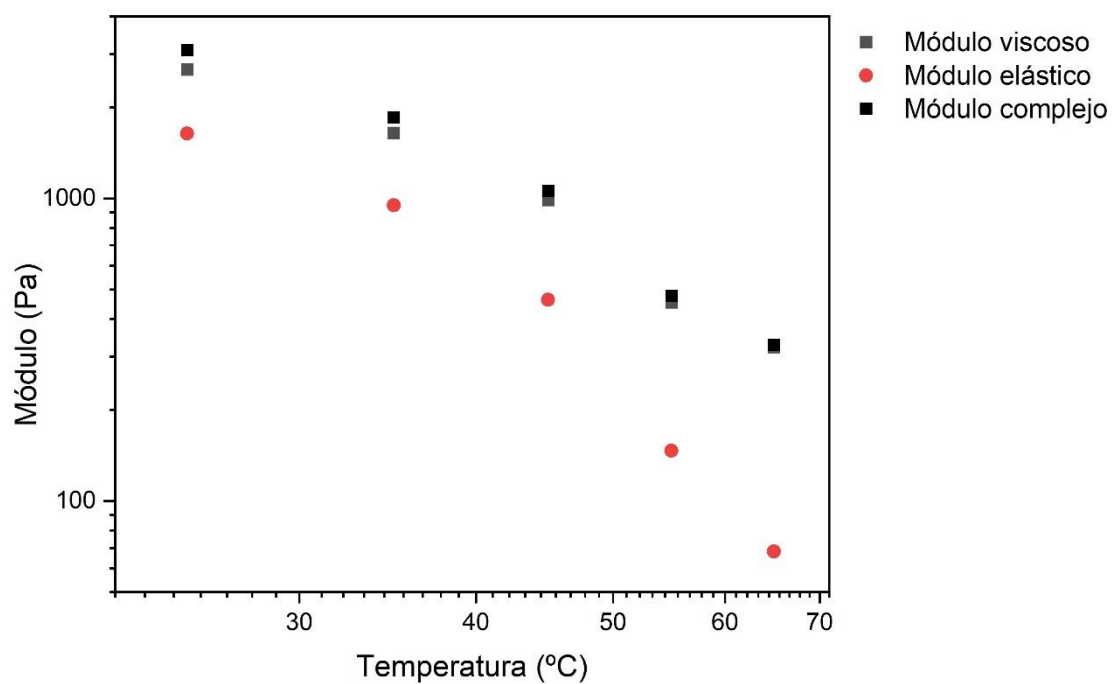


Fig. 6.60. Módulos viscoso, elástico y complejo en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.

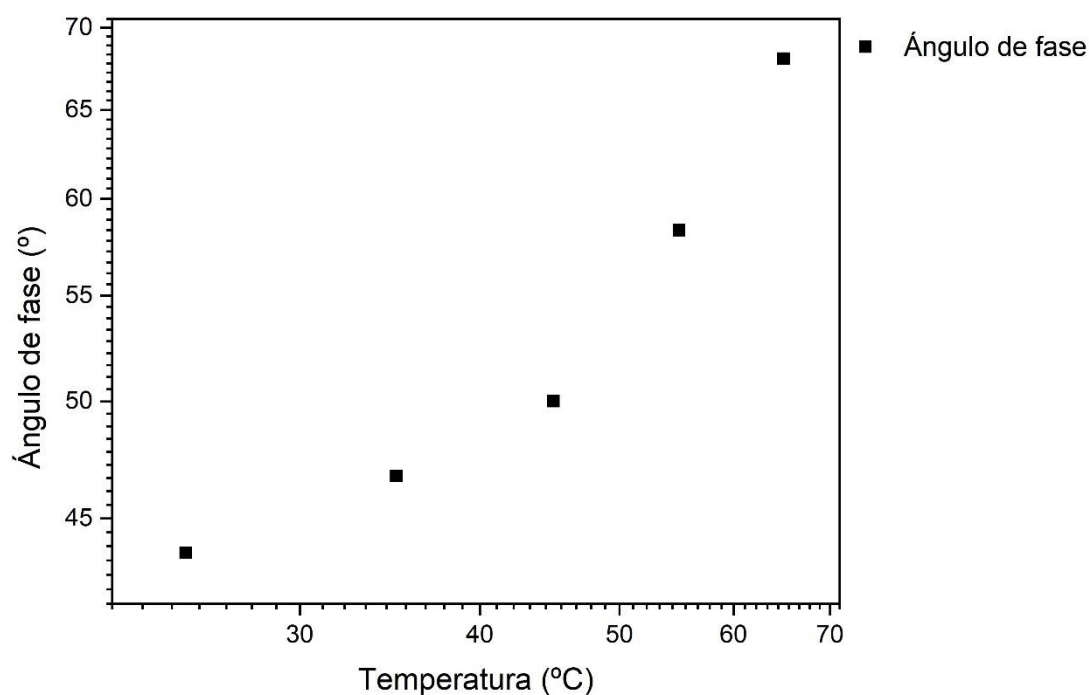


Fig. 6.61. Ángulo de fase en ensayos oscilatorios a diferentes temperaturas para la muestra con una fracción másica del 15 por ciento.

6.3.10. Comparación de resultados en ensayos oscilatorios para muestras con distintas fracciones másicas.

Resultados ensayos oscilatorios para las distintas muestras a 25°C

Fracción másica (%)	η mín. (Pa·s)	η máx. (Pa·s)	Def. mín. (%)	Def. máx. (%)
7.5	1.62	11.33	79.02	314.8
10	1.45	29.37	62.97	250.1
12.5	1.93	79.65	62.79	250.7
15	4.46	205.65	49.13	193.45

Tabla 6.14. Resultados obtenidos para las viscosidades complejas y las deformaciones en ensayos oscilatorios para las distintas muestras a 25°C.

Resultados ensayos oscilatorios para las distintas muestras a 25°C

Fracción másica (%)	G" máx. (Pa)	G' máx. (Pa)	G* máx. (Pa)	δ (°)
7.5	161.84	58.19	169.98	65.18
10	400.26	210.97	440.41	54.23
12.5	1066.42	635.79	1194.82	49.62
15	2663.09	1637.76	3084.77	43.63

Tabla 6.15. Resultados obtenidos para los módulos y el ángulo de fase en ensayos oscilatorios para las distintas muestras a 25°C.

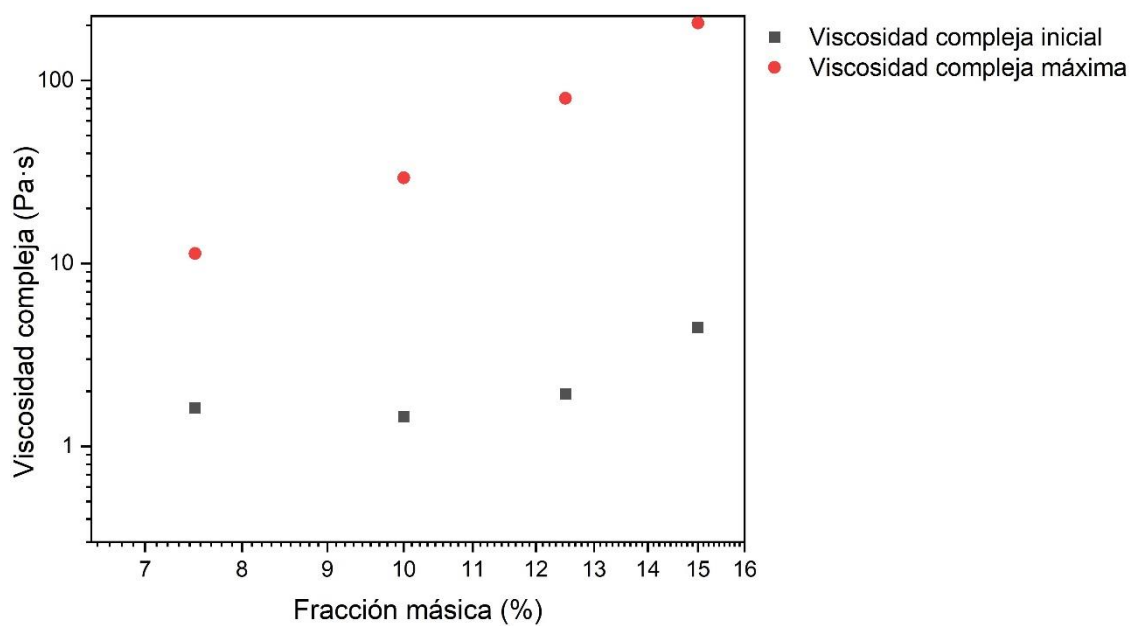


Fig. 6.62. Comparación de las viscosidades complejas iniciales y máximas para ensayos oscilatorios en muestras de diferente fracción másica a 25 °C.

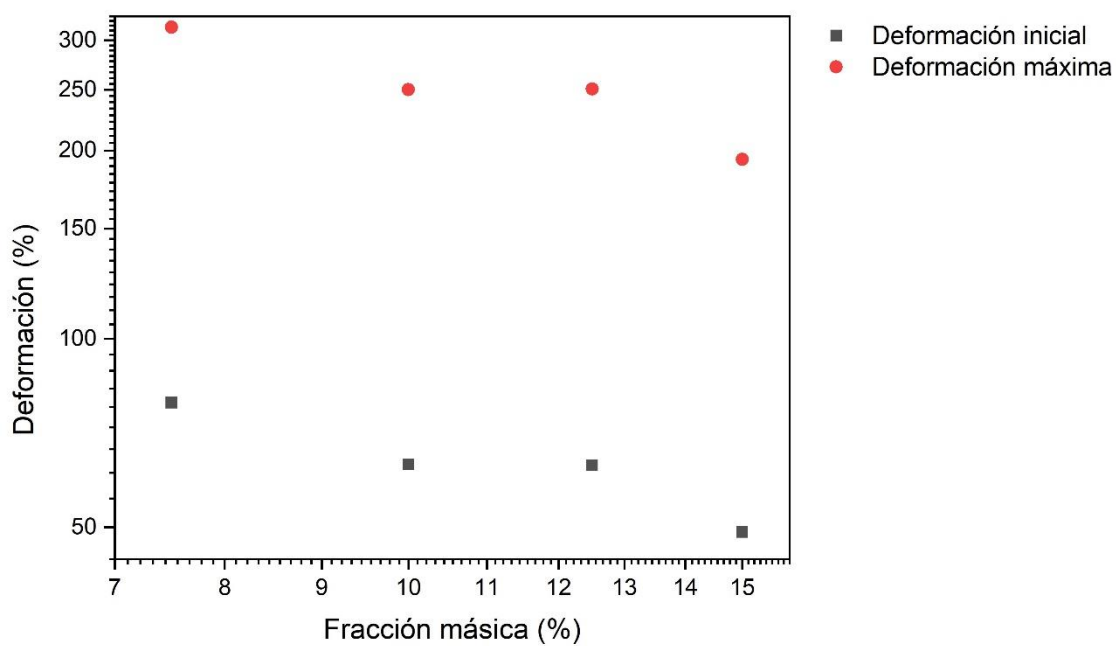


Fig. 6.63. Comparación de las deformaciones iniciales y máximas para ensayos oscilatorios en muestras de diferente fracción másica a 25 °C.

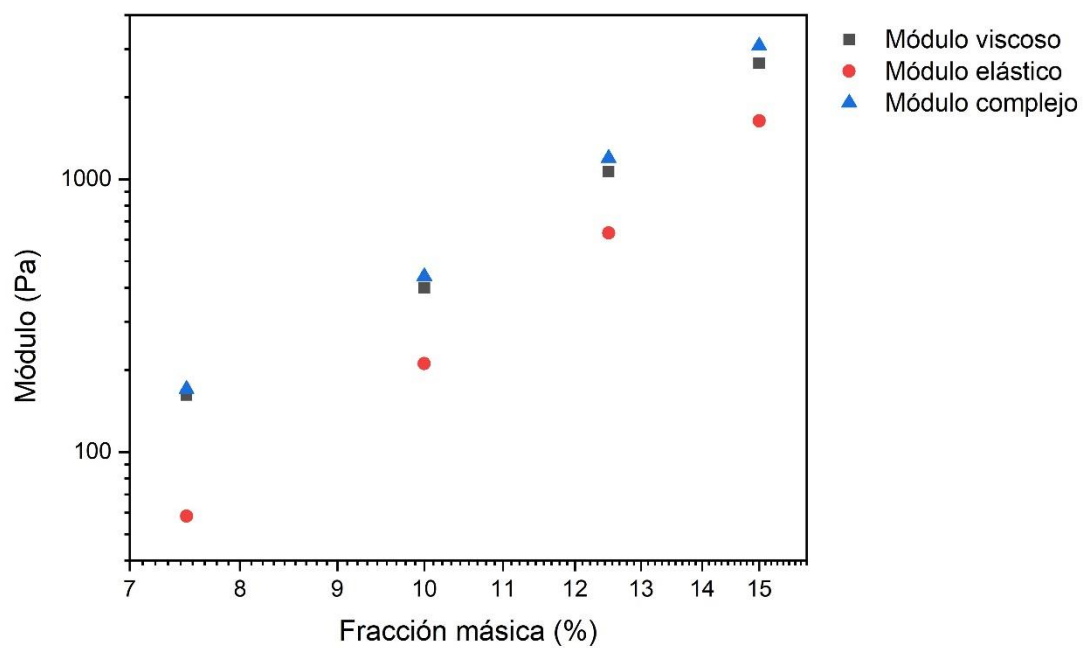


Fig. 6.64. Comparación de los módulos viscosos, elásticos y complejos máximos para ensayos oscilatorios en muestras de diferente fracción másica a 25 °C.

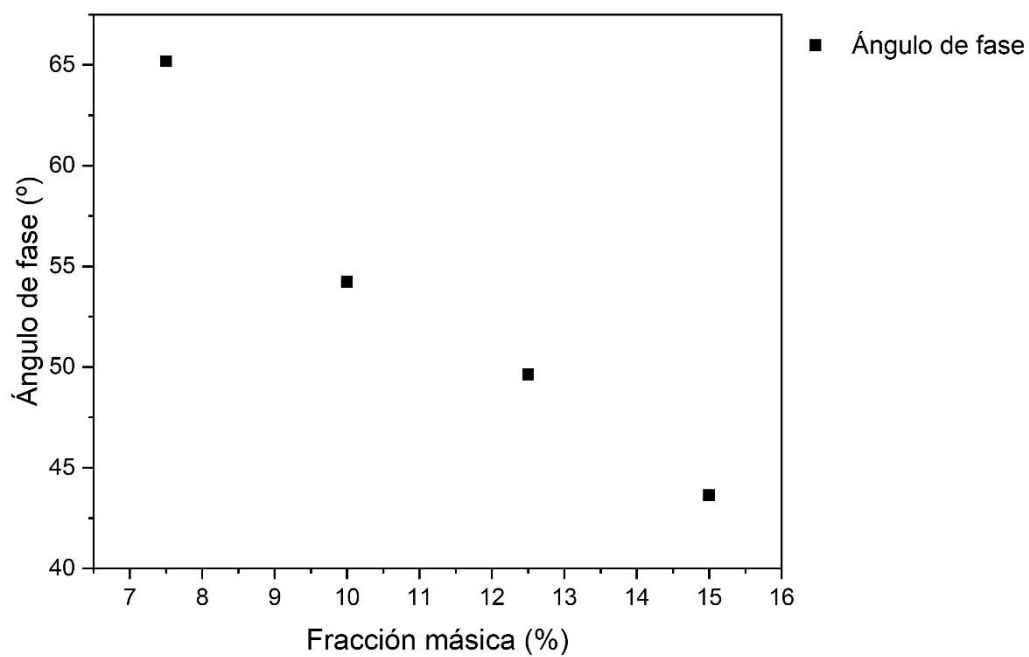


Fig. 6.65. Comparación del ángulo de fase para ensayos oscilatorios en muestras de diferente fracción másica a 25 °C.

Capítulo 7 Conclusiones y trabajos futuros

7.1. Conclusiones

En este Trabajo Fin de Grado se ha estudiado el comportamiento de los fluidos dilatantes a diferentes temperaturas y diferentes fracciones másicas con el fin de conocer más acerca de su comportamiento. Para ello, se han realizado ensayos rotatorios y oscilatorios a muestras de propilenglicol con partículas de sílice con diferente fracción másica y se han comparado los resultados obtenidos en los diferentes ensayos.

En los ensayos rotatorios, se puede observar una fuerte dependencia de la viscosidad del fluido con la temperatura, llegando a disminuir varios ordenes de magnitud al aumentar la temperatura para una muestra con la misma fracción másica. Además, la tensión a la que se comienza a producir el comportamiento dilatantes aumenta ligeramente para una determinada fracción másica aumentando la temperatura, sin embargo, una mayor temperatura hace que esa tensión mínima se produzca a mayores velocidades de cizalla, por tanto, la temperatura no solo disminuye el comportamiento dilatante, sino que también retrasa su aparición. En cuanto a la fracción másica se puede afirmar que un aumento en la fracción másica supone un aumento en la viscosidad del fluido y en su comportamiento dilatante y también favorece a que se produzca a menores velocidades este efecto dilatante sin que aumente significativamente la tensión a la que aparece este efecto.

Por otra parte, en los ensayos oscilatorios, la viscosidad compleja disminuye cuando se aumenta la temperatura, al igual que sucedía en los ensayos rotatorios, y también aumenta la deformación que hay que aplicar a un fluido para que aparezca el comportamiento dilatante. En cuanto a los módulos viscosos, elásticos y complejos su valor disminuye con la temperatura e incluso en el módulo elástico a altas temperaturas. En cuanto al ángulo de fase, este aumenta su valor al aumentar la temperatura acercándose a los noventa grados que sería el comportamiento viscoso ideal, por tanto, un aumento de la temperatura hace que un fluido tenga un comportamiento más parecido al de un fluido viscoso, lo que hace que aumente su capacidad de disipar energía al mismo tiempo que disminuye su capacidad para almacenar energía. A la vista de los resultados obtenidos en los ensayos oscilatorios se puede afirmar que una mayor fracción másica aumenta la viscosidad compleja y hace que la aparición del efecto dilatante se produzca a una menor deformación de la suspensión. Una mayor fracción másica también aumenta los módulos viscosos, elástico y complejo, aunque aumenta en mayor medida el módulo elástico que el módulo viscoso, lo que hace que el ángulo de fase disminuya al aumentar la fracción másica de las suspensiones, haciendo que en el caso concreto de la suspensión con una fracción másica del 15 por ciento a una temperatura de 25 grados su ángulo de fase sea menor a 45 grados y, por tanto, su comportamiento se asemeje más al de un sólido elástico que al de un fluido viscoso en el momento en que se manifiesta el efecto dilatante. Esto hace que la

capacidad de esa suspensión para almacenar energía sea más elevada que su capacidad para disipar energía.

7.2. Trabajos futuros

Este trabajo es una aproximación al comportamiento de los fluidos dilatantes sometidos a distintas temperaturas y en suspensiones con diferentes fracciones másicas. Con los resultados obtenidos se proponen los siguientes trabajos futuros:

- Análisis de la dependencia de los fluidos dilatantes a otros parámetros de control como la presión, la forma de las partículas del soluto o el tamaño de las partículas del soluto o el comportamiento de otro tipo de fluidos como los elásticos o tixotrópicos.
- Diseño de un componente mecánico en el que se emplee un fluido dilatante para su funcionamiento.

Bibliografía

- [1] J. S. Ramírez Navas, “Introducción a la reología de los alimentos”, *ReCiTeLA*, 6ta Ed, n°1, pp.1-46, jun. 2006.
- [2] H. G. Muller, *Introducción a la reología de los alimentos*. Zaragoza (España): Acribia, 1977.
- [3] T. Tian, G. Peng, W. Li, J. Ding y M. Nakano, “Experimental and modelling study of the effect of temperature on shear thickening fluids”, *Korea-Australia Rheology Journal*, vol.27, n°1, pp17-24, febrero 2015.
- [4] E. Brown y H.M. Jaeger, “Shear thickening in concentrated suspensions: phenomenology, mechanisms and relations to jamming”, *Reports on progress in physics*, vol. 77, n°4, abril 2014.
- [5] R.L. Hoffman, “Discontinuous and dilatant viscosity behavior in concentrated suspensions. I. Observation of a flow instability”, *Journal of Rheology*, vol.16, n°1, pp155-174, marzo 1972
- [6] R.L. Hoffman, “Discontinuous and dilatant viscosity behavior in concentrated suspensions. II. Theory and experimental test”, *Journal of colloid and interface science*, vol.46, n°3, pp491-506, marzo 1974.
- [7] R.L. Hoffman, “Discontinuous and dilatant viscosity behavior in concentrated suspensions III. Necessary conditions for their occurrence in viscometric flows”, *Advances in colloid and interface science*, vol.17, n°1, pp161-184, agosto 1982.
- [8] R.G. Egres, F. Nettesheim y N.J. Wagner,” Rheo-SANS investigation of acicular-precipitated calcium carbonate colloidal suspensions through the shear thickening transition”, *Journal of Rheology*, vol.50, n°5, septiembre 2006.
- [9] J. Ding, P.J. Tracey, W. Li, G. Peng y P.G. Whitten, “Review on shear thickening fluids and applications”, *Textiles and light industrial science technology*, vol. 2, n°4, pp161-173, octubre 2013.
- [10] D.P. Kalman, “Microstructure and Rheology of concentrated suspensions of near hard-sphere colloids”, Tesis doctoral, University of Delaware, Delaware, US, 2010. [En línea]. Disponible en:
ftp://ncnr.nist.gov/pub/sans/butler/DPK_Thesis_Final.pdf
- [11] B.J. Maranzano y N.J. Wagner, “The effects of particle size on reversible shear thickening of concentrated colloidal dispersions”, *The Journal of chemical physics*, vol. 114, n°23, junio 2001.
- [12] D. Cohen, “Shear-thickening fluid reinforced fabrics for use with an expandable spacecraft”, U.S. Patente 0296435, 4 de diciembre, 2008.
- [13] C. Fischer et al., “Dynamic properties of sandwich structures with integrated shear-thickening fluids”, *Smart material and structures*, vol.15, n°5, pp1467-1475, septiembre 2006.
- [14] C. Fischer, “Structures with adaptive stiffness and damping integrating shear thickening fluids”. Patente WO2009053946, 2009.
- [15] T.H. Williams, “Surgical and medical garments and materials incorporating shear thickening fluids”, U.S. Patente 0255023, 15 de octubre, 2009.

[16] M.R. Jolly y J.W. Bender, “Field responsive shear thickening fluid”, U.S. Patente 0231357, 13 de junio, 2006.

[17] TA Instruments, “Rheology Theory and applications”, 2016. [En línea]. Disponible en:

<http://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/CA-2016-Rheology.pdf>

[18] Laboratorio de formulación, interfases, reología y procesos. Universidad de los Andes, “Cuaderno FIRP S521-C Fundamentos de Reología”, 2012. [En línea]. Disponible en:

<http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S521C.pdf>